

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ТАРГАН ДМИТРО ВАЛЕНТИНОВИЧ

УДК 621.923

ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ МІТЧИКІВ ІЗ ШВИДКОРІЗАЛЬНОЇ СТАЛІ
МАГНІТНО-АБРАЗИВНИМ МЕТОДОМ

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування
Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Д.В. Тарган

Науковий керівник Майборода Віктор Станіславович,
доктор технічних наук, професор

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Тарган Д.В. Підвищення якості мітчиків із швидкорізальної сталі магнітно-абразивним методом. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2021.

В дисертаційній роботі розроблено науково-практичні засади підвищення параметрів якості та роботоздатності мітчиків із швидкорізальної сталі за рахунок використання на фінішних етапах їх виготовлення методу магнітно-абразивного оброблення (МАО). Визначено технологічні режими та умови оброблення мітчиків, що забезпечують якісне рівномірне та продуктивне полірування робочих поверхонь, формування мікро- та макрогеометрії різальних кромek, видалення завусенок, мікроконцентраторів напружень у вигляді задирок, виливів матеріалу, отриманих на попередніх операціях виготовлення різального інструменту робочих поверхнях та підвищення фізико-механічних властивостей поверхневих шарів.

Вперше розроблено геометричну та математичну модель МАО мітчиків з кутом профілю 60° незалежно від діаметру на верстатах з кільцевим розташуванням робочої зони, що враховує особливості взаємодії оброблюваних поверхонь з магнітно-абразивним інструментом (МАІ) та дозволяє визначити раціональні умови оброблення для прогнозованого забезпечення мікрогеометрії робочих поверхонь і фізико-механічних властивостей поверхневого шару інструменту. Встановлено закономірності впливу умов розташування мітчиків в робочій зоні верстату на ефективне оброблення їх робочих поверхонь з урахуванням утворення тіньових зон та зон «перекривання» зубцями мітчика в процесі МАО.

Вперше встановлено особливості впливу умов МАО на показники експлуатаційної стійкості, характер зносу робочих поверхонь мітчиків із швидкорізальної сталі в лабораторних умовах та умовах реального виробництва.

Визначено вплив умов МАО на мікроструктурні характеристики, поверхневу твердість робочих елементів і на зміну твердості по глибині матеріалу мітчиків.

Проаналізовано фінішні методи оброблення осьового різального інструменту. Розглянуто літературні джерела, в яких описані особливості оброблення мітчиків та способи підвищення їх роботоздатності.

Розроблено метод розрахунку кількісної оцінки дій квазістабільних об'ємів МАІ на робочі поверхні мітчиків під час оброблення. Визначено особливості процесу МАО мітчиків в робочих зазорах кільцевого типу в залежності від особливостей їх базування в зоні оброблення. Встановлено, що за результатами розрахунків можна виконувати прогнозування вірогідного впливу базування мітчиків в робочій зоні на якість оброблення їх робочих поверхонь. Визначено, що інтегральна інтенсивність оброблення за нормальною складовою IV_n та тангенціальною складовою IV_t збільшуються рівномірно при збільшенні кутових швидкостей для всіх варіантів базування мітчиків в робочій зоні верстату. Показано, що при кутах нахилу мітчиків до площини робочої зони верстату $p = 20-60^\circ$ обробляються лише точки, близькі до вершин, на вершинах зубців та на забірному конусі. Тобто, МАО мітчиків при $p = 20-60^\circ$ є недоцільним, тому що частина поверхонь знаходиться в зоні «перекривання», де відсутній активний процес взаємодії з МАІ. Ефективне МАО мітчиків доцільно виконувати за умов їх розташування під кутом $p = 60-90^\circ$ до площини робочої зони верстату.

Експериментальні дослідження проводили на мітчиках М12×1,75-6Н, М10×1-6Н, М10×1,5-6Н, М6×0,75-6Н з прямими стружковими канавками, М10×1,5-6Н з підточуванням передньої поверхні, М10×1,5-6Н з гвинтовими стружковими канавками, виготовленими із швидкорізальної сталі Р6М5 різних

виробників для нарізання метричної різьби, які представляють основну частину даного інструменту на виробництві.

Оброблення мітчиків виконували на дослідно-промисловому магнітно-абразивному верстаті, виготовленому на базі вертикально фрезерного верстату типу ОЦ – Іжевськ та на модернізованому верстаті ЛФ-260 із спеціальними головками, які забезпечують різні варіанти розташування мітчиків в робочій зоні та режими оброблення.

Для МАО мітчиків використовували порошки отримані методом диспергування розплавів Поліам-Т з розміром зерен 200/160 мкм, 400/315 мкм, Поліам-М 400/315 мкм, Царамам 630/400 мкм та розпилений порошок швидкорізальної сталі ПР Р6М5 з зернистістю 200/160 мкм. В якості МОТС використовували АСФОЛ, який складається з синтетичних та рослинних масел.

Вимірювання шорсткості поверхні виконували на спеціальному модулі, зібраному на основі профілометра моделі 296 та профілографі-профілометрі 252. Контролювали величину параметру шорсткості Ra на робочих поверхнях та на хвостовику мітчиків.

Визначення поверхневої твердості робочої частини мітчиків виконували на мікротвердомірі ПМТ-3 з різними навантаженнями на індентор на задній поверхні зубців. Дослідження мікроструктури виконували на растрово-електронному мікроскопі РЕМ-106И.

Вимірювання мікрогеометричних характеристик різальних кромek мітчиків виконували на оптичному приладі *MikroCAD*, який дозволяє визначати форму та величину радіусів округлення різальних кромek в необхідних перерізах. Для визначення впливу МАО на точність мітчиків, контролювали зміну зовнішнього діаметру різьби. Вимірювання точності виконували на установці для розмірного налаштування та вимірювання різальних інструментів Venturion 450/6. Дослідження силових характеристик при експлуатації мітчиків проводили на вертикально – свердлильному верстаті із застосуванням універсального динамометра УДМ-600, котрий приєднано через узгоджувальний пристрій до електронно-обчислювальної машини. Вимірювання

зносу зубців мітчика проводили на інструментальному мікроскопі ММИ-2. Вимірювали максимальну величину зносу по задній поверхні від різальних кромek. При дослідженнях експлуатаційної стійкості мітчиків, за критерій стійкості було прийнято знос по задній поверхні на рівні 0,3 мм. Саме така величина зносу достатня для забезпечення точності нарізаної різьби, яку контролювали різбовою калібром-пробкою.

Встановлено, що найкращий результат чистоти робочих поверхонь отримано магнітно-абразивним порошком Поліам-Т. Шорсткість на задній поверхні зменшилася з $Ra = 0,57$ мкм до $Ra = 0,4$ мкм, а на передній поверхні з $Ra = 0,13$ мкм до $Ra = 0,1$ мкм. МАО порошком Поліам-М 400/315 мкм та Царамам 630/400 мкм не призводить до зміни шорсткості на задній та передній поверхнях інструменту.

Для зменшення шорсткості на передній поверхні ефективно проводити оброблення з мінімально допустимим кутом нахилу мітчиків до площини робочої зони $p = 60-70^\circ$. При таких кутах базування, шорсткість на передній поверхні досліджуваних мітчиків зменшили до $Ra = 0,1-0,2$ мкм, на задній – до $Ra = 0,5-0,6$ мкм. Для максимального зменшення шорсткості на задніх поверхнях слід проводити МАО при вертикальному розташуванні мітчиків до площини робочої зони верстату. В такому випадку шорсткість на задній поверхні зменшується до $Ra = 0,1-0,2$ мкм, на передній – до $Ra = 0,2-0,4$ мкм. Доведена можливість контрольованої та прогнозованої зміни величини шорсткості робочих поверхонь мітчиків із швидкорізальної сталі в процесі МАО.

За результатами досліджень встановлено, що МАО мітчиків при $p = 60-70^\circ$ сприяє збільшенню величини радіусів округлення різальних кромek до 20-35 мкм, в результаті чого збільшується період стійкості мітчиків. На формування величини радіусів округлення різальних кромek суттєвий вплив має саме тангенціальна складова інтенсивності оброблення, тому після МАО з кутами $p = 80-90^\circ$ радіуси округлення кромek інструменту майже не змінюються.

При МАО з раціональними кутами нахилу мітчиків до площини робочої зони верстату $p = 60-90^\circ$ можливе зменшення поверхневої твердості мітчиків до

10%, що пов'язано з видаленням дефектного шару матеріалу та утворенням підшарового максимуму.

Встановлено, що після МАО під поверхнею знаходиться зона з відносно зниженою мікротвердістю, що пов'язано з виходом на поверхню в процесі пластичного деформування дефектів матеріалу тонкого поверхневого шару та невеликим відтисненням дрібнодисперсних карбідів вглиб матеріалу. В поверхневому шарі мітчиків після МАО порошком Полімам-Т 400/315 мкм утворюється підшаровий максимум на глибині 8-12 мкм, а після оброблення Полімам-Т 200/160 мкм – на глибині 2-5 мкм. Наявність підшарового максимуму пов'язано з ударно-фрикційним впливом частинок порошкового інструменту з оброблюваною поверхнею. Ступінь наклепу поверхневого шару після МАО порошком Полімам-Т 400/315 мкм досягає 37%, а Полімам-Т 200/160 мкм – 26%, в той час як після шліфування за стандартною технологією – 19%.

Після МАО карбідні зерна в швидкорізальній сталі мітчиків подрібнюються під час ударної взаємодії з МАІ, підвищується їх дисперсність, що сприяє формуванню більш однорідної структури сталі, підвищенню твердості, зносостійкості. Величина карбідів в шарі глибиною до 150 мкм у мітчиків після МАО на 25-30% менша ніж в необроблених. Дрібні дисперсні карбіди розташовані щільніше та рівномірніше після оброблення порошком Полімам-Т 400/315 мкм, що можна пояснити більшою енергією, яка передається поверхневому шару матеріалу в процесі ударно-фрикційної взаємодії частинок МАІ з оброблюваною поверхнею. Залишкові напруження та зростання щільності дислокацій в приповерхневому шарі спричиняють подрібнення карбідів матеріалу на значній глибині від поверхні основи та зменшення їх розмірів на 10%.

Доведено, що МАО мітчиків, при правильно підібраній тривалості процесу, не призводить до критичної зміни діаметрів, що в процесі експлуатації може призвести до бракування деталей. Встановлено, що різке зменшення діаметру відбувається в перші 3-6 хв оброблення. Причиною цього є видалення завусенок з вершин зубців та дефектів після шліфування, а також заокруглення

різальних кромок інструменту. Для мітчиків M12 та M10 за перші 3-6 хв МАО зовнішній діаметр в середньому зменшився на 20 мкм, для мітчиків M6 – на 15 мкм. Зменшення діаметру при МАО мітчиків циклічно повторюється, що можна пояснити циклічною зміною фізико-механічних властивостей тонких поверхневих шарів матеріалу інструменту та їх періодичним видаленням.

МАО мітчиків в результаті позитивного комплексного впливу на мікрогеометрію, радіуси округлення різальних кромок, структуру та твердість матеріалу робочої частини інструменту приводить до зменшення крутного моменту при нарізанні різьби у 2 рази, з $M_{max} = 27$ Н·м до $M_{max} = 16$ Н·м. Після МАО у мітчиків відсутнє різке збільшення сил при врізанні інструменту, що суттєво впливає на підвищення стійкості як окремих зубців так і всієї робочої частини.

Проведені дослідження впливу методу МАО мітчиків на їх стійкість показали, що даний метод фінішного оброблення при раціональних умовах забезпечує підвищення стійкості в 2 – 3 рази. Найбільший знос по задній поверхні зафіксовано на 2 та 3 зубцях, тому що вони сприймають найбільше навантаження в процесі нарізання різьби. Найкращі результати отримано при МАО з використанням магнітно-абразивного порошку Полімам-Т з осколькою формою частинок та при $p = 70^\circ$, оскільки при такому розташуванні майже відсутні зони «перекривання» і всі поверхні піддаються комплексному впливу методу.

Фінішний метод МАО забезпечує зменшення вірогідності повного руйнування мітчиків при експлуатації більш ніж у 2 рази в порівнянні з необробленими, що знижує фінансові витрати на інструмент, бракування деталей та підвищення продуктивності виробництва.

Результати роботи по застосуванню запропонованої технології підвищення якості та роботоздатності мітчиків із швидкорізальної сталі було використано на підприємстві «Група компаній «Веда», що дозволило знизити їх витрати у 1,5-2 рази. Проведено спільні дослідження і отриманні результати роботи використано на фірмі ZOM Oberflächenbearbeitung GmbH, Німеччина, що

дозволило виконувати прогнозоване оброблення мітчиків та отримати необхідні параметри їх якості. Результати роботи впроваджено в навчальний процес кафедри інтегрованих технологій машинобудування при викладанні курсу «Методи та обладнання для підвищення працездатності різального інструменту».

Ключові слова: мітчик, магнітно-абразивне оброблення, інтегральна інтенсивність оброблення, шорсткість, твердість, радіуси округлення різальних кромek, міцність, стійкість, роботоздатність.

ABSTRACT

Dmytro Tarhan. Improving the quality of high-speed steel taps by magneto-abrasive machining. Qualification scientific manuscript copyright.

Thesis for the scientific degree of the doctor of philosophy, the field of study 13 – Mechanical engineering, program subject area 133 – Industrial machinery engineering. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2021.

The scientific and practical bases of increase of parameters of quality and working capacity of high-speed steel (HSS) taps at the final stages of their manufacturing by magneto-abrasive machining (MAM) were developed in the work. Technological modes and conditions of taps machining were determined, which provide high-quality uniform and productive polishing of working surfaces, the formation of micro- and macrogeometry of cutting edges, removal of burrs, microconcentrators of stresses in the form of burrs, material defects obtained in previous operations and improvement of physico-mechanical properties of surface layers.

Geometric and mathematical models of MAM of taps with a profile angle of 60° regardless of the diameter were developed for the first time on machines with a circular arrangement of the working area. Which takes into account the features of the

interaction of the machined surfaces with the magneto-abrasive tool (MAT) and allows determining the rational machining conditions for the predicted provision of microgeometry of working surfaces and physico-mechanical properties of the tool surface layer. Regularities of influence of conditions of the arrangement of taps in a working zone of the machine on effective machining of their working surfaces taking into account the formation of "shadow" and "overlapping" zones in MAM process were established.

The features of the influence of MAM conditions on the indicators of operational stability, the nature of wear of the working surfaces of HSS taps in laboratory conditions and the conditions of real production were established for the first time.

The influence of MAM conditions on microstructural characteristics, the surface hardness of working elements and on change of hardness on the depth of material of taps were defined.

Finishing methods of machining of the axial cutting tool were analyzed. The literature sources were considered in which features of machining of taps and ways of increase of their working capacity were described.

The method for calculating a quantitative estimate of the influence of quasi-stable volumes of MAT on the working surfaces of taps during machining was developed. The peculiarities of the MAM process of taps in the circular type working gaps depending on features of their basing in the working area were defined. Was established that according to the results of calculations, it is possible to predict the influence of the taps basing in the working area of the machine on the quality of machining of their working surfaces. It was determined that the integral machining intensity for the normal component IV_n and the tangential component IV_τ increase uniformly with increasing angular velocities for all variants of taps basing in the working zone of the machine. Only points close to tops, on tops of teeth and a cone are machined at angles of inclination of taps to the plane of a working zone of the machine $p = 20-60^\circ$. MAM of taps is impractical at $p = 20-60^\circ$ because part of the surfaces is in an "overlapping" area, where there is no active process of interaction with MAT.

Effective MAM of taps should be performed under the conditions of their location at an angle $p = 60-90^\circ$ to the plane of the working area of the machine.

Experimental research was performed on taps M12×1,75-6H, M10×1-6H, M10×1,5-6H, M6×0,75-6H with straight chip grooves, M10×1,5-6H with grinded rake face, M10×1,5-6H with screw chip grooves of various manufacturers. Taps made of high-speed steel brand "P6M5" for cutting metric threads, which are the main part of this tool in production.

Machining of taps was performed on an experimental-industrial magneto-abrasive machine made on the basis of a vertical milling machine type "ОЦ – Ижевск" and on an upgraded machine "ЛФ-260" with special heads that provide different options for the basing of taps in the working area and machining modes.

The powders Polyam-T with grain sizes of 200/160 μm , 400/315 μm , Polymam-M 400/315 μm , Tsaramam 630/400 μm and sprayed powder of high-speed steel PR R6M5 200/160 μm were used for MAM of taps. As a lubricating-cooling fluid was used "АЦФОЛ", which consist of synthetic and plant oils.

Surface roughness measurements were performed on a profilometer model 296 and profilometer model 252. The value of the roughness parameter Ra on the working surfaces and the shank of the taps was controlled.

Determination of the surface hardness of the working part of the taps was performed on a microhardness tester "ИИМТ-3" with different loads on the indenter on the flank surface of the teeth. Studies of the microstructure were performed on the electron microscope "РЭМ-106И".

Measurement of microgeometric characteristics of the cutting edges of the taps was performed on an optical device MikroCAD, which allows determining the shape and magnitude of the radius of cutting edges rounding in the required cross sections. The outer diameter of the thread was controlled to determine the effect of MAM on the accuracy of the taps. Accuracy measurements were performed on installation for dimensional adjustment and measurement of cutting tools Venturion 450/6. Research of power characteristics during tapping was carried out on the vertically-drilling machine with the use of the universal dynamometer "УДМ-600", which is connected

to PC. Measurement of wear of the tap's teeth was performed on an instrumental microscope "ММН-2", and the maximum amount of wear on the flank surface from the cutting edges was measured. In studies of the operational stability of the taps, the criterion of stability was taken as the wear on the flank surface at the level of 0.3 mm. This amount of wear is sufficient to ensure the accuracy of the thread cutting, which was controlled by a thread plug gauge.

The best roughness of working surfaces is obtained by magnetic abrasive powder Polimam-T. The roughness on the flank surface decreased from $Ra = 0.57 \mu\text{m}$ to $Ra = 0.4 \mu\text{m}$, and on the rake surface from $Ra = 0.13 \mu\text{m}$ to $Ra = 0.1 \mu\text{m}$. MAM with powder Polyam-M 400/315 μm and Tsaram 630/400 μm does not change the roughness on the flank and rake surfaces of the tool.

To reduce the roughness on the rake surface it is effective to carry out machining with the minimum allowable inclination angle of the taps to the plane of the working area $p = 60-70^\circ$. At such basing angles, the roughness on the rake surface of the studied taps was reduced to $Ra = 0.1-0.2 \mu\text{m}$, on the flank to $Ra = 0.5-0.6 \mu\text{m}$. For the maximum reduction of roughness on flank surfaces, it is necessary to carry out MAM at the vertical arrangement of taps to the plane of a working zone of the machine. In this case, the roughness on the flank surface decreases to $Ra = 0.1-0.2 \mu\text{m}$, on the rake – to $Ra = 0.2-0.4 \mu\text{m}$. The possibility of controlled and predicted changing of the roughness of the working surfaces of HSS taps in the MAM process was proved.

According to the results of the research was established that MAM of the taps at $p = 60-70^\circ$ increases the value of the radius of cutting edge rounding to 20-35 μm . The tangential component of the integrated machining intensity has a significant effect on the formation of the value of the radius of cutting edge rounding, so after MAM with angles $p = 80-90^\circ$ the radius of cutting edge rounding of the tool almost do not change.

At MAM with angles of inclination of taps to the plane of a working zone of the machine $p = 60-90^\circ$ reduction of surface hardness of taps to 10% is possible. This is due to the removal of the defective layer of material and the formation of a sublayer maximum.

It is established that after MAM there is a zone with relatively reduced microhardness under the surface. This is due to the rising on the surface during the process of plastic deformation of the defects of the material of the thin surface layer and a small displacement of fine carbides into the material. In the surface layer of the taps after MAM with powder Polimam-T 400/315 μm , a sublayer maximum is formed at a depth of 8-12 μm , and after machining with Polimam-T 200/160 μm – at a depth of 2-5 μm . The presence of the sublayer maximum is associated with the impact-friction effect of the powder tool particles with the machined surface. The degree of hardening of the surface layer after MAM with powder Polimam-T 400/315 μm reaches 37%, and Polimam-T 200/160 μm – 26%, while after grinding by standard technology - 19%.

After MAM carbide grains in high-speed steel of taps are crushed after MAM during impact interaction with MAT. This contributes to the formation of the more homogeneous structure, increase hardness and wear resistance. The size of carbides in the layer up to 150 μm deep in taps after MAM is 25-30% less than in untreated. Fine dispersed carbides are located denser and more evenly after machining with Polimam-T 400/315 μm powder. This can be explained by the higher energy transmitted to the surface layer of the material in the process of shock-friction interaction of MAT particles with the treated surface. Residual stresses and an increase in the density of dislocations in the near-surface layer cause the breaking of carbides of the material at a considerable depth from the surface of the base and a decrease in their size by 10%.

MAM of taps at the right duration of the process does not lead to a critical change of diameters, which during operation can lead to a defective of parts. A sharp decrease in diameter occurs in the first 3-6 minutes of machining. The reason for this is the removal of burrs from the tops of the teeth and defects after grinding, as well as the rounding of the cutting edges of the tool. Outer diameter decreased by an average of 20 μm for M12 and M10 taps and of 15 μm for M6 taps for the first 3-6 min of MAM. The decrease in the diameter of taps is repeated cyclically, which can be explained by the cyclic change of the physico-mechanical properties of the thin surface layers of the tool material and their periodic removal.

MAM of the taps reduces the torque in 2 times, from $M_{max} = 27 \text{ N}\cdot\text{m}$ to $M_{max} = 16 \text{ N}\cdot\text{m}$ as a result of a positive complex effect on the microgeometry, radiuses of cutting edge rounding, structure and hardness of the material of the working part of the tool. The taps do not have a sharp increase in forces after MAM, which significantly affects the stability of both individual teeth and all working part.

Studies of the effect of method of MAM the taps on their durability showed, that this method of finishing provides at rational conditions an increase the durability in 2-3 times. The greatest wear on the flank surface is recorded on the 2nd and 3rd teeth because they receive the greatest load in the process of tapping. The best results were obtained after MAM by using Polymam-T powder with the splintered shape of grains at $p = 70^\circ$. At such an arrangement there are almost no zones of "overlapping" and all surfaces are exposed to the complex influence of a method.

The finishing method MAM reduces the probability of complete failure of the taps during operation by more than 2 times compared to the not machined, which reduces the financial cost of the tool, the defective of parts and increase productivity.

The results of the work on the application of the proposed technology to improve the quality and efficiency of HSS taps were used at the enterprise "Group of the companies "VEDA", which reduced of taps costs by 1.5 to 2 times. Joint research was carried out and the obtained results were used at ZOM Oberflächenbearbeitung GmbH, Germany, which allowed to perform the predicted machining of the taps and obtain the necessary parameters of their quality. The results of the work were introduced into the educational process of the department of integrated technologies of mechanical engineering in teaching the course "Methods and equipment to improve the efficiency of the cutting tool".

Keywords: tap, magneto-abrasive machining, integral intensity of machining, roughness, hardness, radiuses of cutting edges rounding, durability, stability, efficiency.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Вплив магнітно-абразивного оброблення на якість мітчиків із швидкорізальної сталі / В.С. Майборода, І.В. Ткачук, Д.Ю. Джулій, Д.В. Тарган. *Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2013. №772. С. 202-207. (Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз впливу МАО на мікрогеометрію різальних кромок та поверхонь мітчиків.)
2. Майборода В.С., Тарган Д.В. Вплив магнітно-абразивного оброблення на мікрогеометрію та експлуатаційні показники мітчиків зі швидкорізальної сталі. *Процеси механічної обробки в машинобудуванні*. 2015. №15. С. 59-65. URL: <http://pmo.ztu.edu.ua/article/view/60746> (Здобувачем виконано експериментальну роботу по обробленні та експлуатації мітчиків, проведено вимірювання зносу зубців та аналіз результатів досліджень.)
3. Тарган Д.В., Майборода В.С., Джулій Д.Ю. Аналіз інтенсивності магнітно-абразивного оброблення мітчиків в залежності від кінематичних параметрів процесу. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Сучасні технології в машинобудуванні, транспорті та гірництві*. 2017. №106. С. 82-88. URL: http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2017_5_82-88_5-2017.pdf (Здобувачем запропоновано геометричне та математичне моделювання процесу МАО мітчиків з кутом профілю 60° на верстаті з кільцевим розташуванням робочої зони та виконано аналіз впливу кута нахилу мітчика на інтенсивність оброблення.)
4. Майборода В.С., Тарган Д.В., Мусіюк О.Б. Магнітно-абразивне оброблення мітчиків із швидкорізальної сталі на верстаті з кільцевим розташуванням робочої зони. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*. 2017. №40. С. 105-114. (Здобувачем виконано вимірювання мікрогеометрії та поверхневої твердості мітчиків, проаналізовано вплив вертикального розташування мітчиків в робочій зоні верстату на параметри їх якості.)

5. Тарган Д.В., Майборода В.С. Вплив магнітно-абразивного оброблення на твердість та структуру матеріалу мітчиків із швидкорізальної сталі. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2017. №61. С. 119-125. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtu_2017_2_17 (Здобувачем запропонована методика дослідження твердості по глибині матеріалу робочої частини мітчиків, виконана експериментальна робота та аналіз результатів.)
6. Вплив магнітно-абразивного оброблення на якість шпонкових фрез із швидкорізальної сталі / В.С. Майборода, І.В. Слободянюк, Д.Ю. Джулій, Д.В. Тарган. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Технології в машинобудуванні*. 2018. №6(1282). С. 55-59. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/37216> (Здобувачем проведено експериментальні дослідження та аналіз впливу складу магнітно-абразивного інструменту на шорсткість та твердість робочих поверхонь.)
7. Вплив кінематики процесу магнітно-абразивного оброблення на параметри якості робочих поверхонь мітчиків із швидкорізальної сталі / Д.В. Тарган, В.С. Майборода, О.А. Плівак, Г.Г. Добровольський. *Вісник ЖДТУ*. Серія: *Технічні науки*. 2018. №81. С. 48-53. DOI: [https://doi.org/10.26642/tn-2018-1\(81\)-48-53](https://doi.org/10.26642/tn-2018-1(81)-48-53) (Здобувачем запропонована методика наглядної оцінки якості магнітно-абразивного оброблення поверхонь мітчиків в залежності від кута нахилу інструменту до площини робочої зони верстату та виконано аналіз результатів експериментальних досліджень.)
8. Influence of magneto-abrasive machining duration on the precision of hss taps / V. Maiboroda, D. Tarhan, O. Byelyayev, D. Dzhulii. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*. 2019. Vol. 96. P. 70–76. DOI: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2019.04.070 (Здобувачем виконано експериментальні дослідження та аналіз результатів вимірювання зовнішнього діаметру мітчиків.)
9. Features of magneto-abrasive machining of taps / V. Maiboroda, D. Tarhan, D. Dzhulii, I. Slobodianiuk. *Acta Mechanica et Automatica*. 2020. Vol. 14(1). 7 p. DOI: <https://doi.org/10.2478/ama-2020-0001> (Здобувачем

запропоновано метод оцінки інтенсивності оброблення, проведено розрахунки інтегральної інтенсивності МАО мітчиків та аналіз результатів. Визначено особливості процесу МАО мітчиків та запропоновано режими для їх ефективного оброблення.)

Роботи апробаційного характеру:

10. Майборода В.С., Ткачук І.В., Тарган Д.В. Магнітно-абразивне оброблення мітчиків, виготовлених із швидкорізальної сталі. *Прогресивні технології в машинобудуванні*: зб. наук. праць II-ої Всеукраїнської наук.-техн. конф. (м. Львів, 10-15 лютого 2014р). Львів, 2014. С. 38. *(Здобувачем виконано експериментальні дослідження та аналіз результатів вимірювання шорсткості та твердості)*

11. Тарган Д.В., Красновид Д.О. Умова вільного розміщення стружки в канавках мітчиків. *Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї, наука, виробництво*: тези доповідей XIV Всеукраїнської мол. наук.-техн. конф. (27–31 жовтня 2014 р., м. Суми). Суми: СумДУ, 2014. С. 95-96. *(Здобувачем виконано аналіз конструктивних параметрів стружкової канавки мітчика.)*

12. Тарган Д.В., Красновид Д.О., Майборода В.С. Дослідження геометрії мітчиків із швидкорізальної сталі після магнітно-абразивного оброблення. Тези доповідей загальноунівер. наук.-техн. конф. молодих вчених та студ., присвяченої дню Науки. Секція "Машинобудування", підсекція Інтегровані технології машинобудування". Київ: НТУУ "КПІ", 2014. С. 89. *(Здобувачем проведено вимірювання зовнішнього діаметру мітчиків та визначено вплив МАО на зміну параметра.)*

13. Тарган Д.В., Майборода В.С., Бесарабець Ю.Й. Вплив магнітно-абразивного оброблення на якість мітчиків із швидкорізальної сталі. Тези доповідей загальноунівер. наук.-техн. конф. молодих вчених та студ., присвяченої дню Науки. Секція "Машинобудування", підсекція Інтегровані технології машинобудування". Київ: НТУУ "КПІ", 2014. С. 91-92. *(Здобувачем виконано експериментальні дослідження та аналіз результатів вимірювань)*

радіусів округлення та шорсткості)

14. Тарган Д.В., Майборода В.С., Красновид Д.О. Вплив магнітно-абразивного оброблення на стійкість мітчиків із швидкорізальної сталі. Тези доповідей загальноунівер. наук.-техн. конф. молодих вчених та студ., присвяченої дню Науки. Секція "Машинобудування", підсекція "Інтегровані технології машинобудування". Київ: НТУУ "КПІ", 2015. С. 102. *(Здобувачем виконано експериментальну роботу по обробленні та експлуатації мітчиків, проведено вимірювання зносу зубців та аналіз результатів досліджень.)*

15. Тарган Д.В., Майборода В.С., Вовк В.В. Дослідження впливу підточування передньої поверхні на геометрію в процесі різання та стійкість мітчиків, виготовлених із швидкорізальної сталі. *Інновації молоді – машинобудуванню, секція "Інтегровані технології машинобудування": збірка матер. Всеукраїнської наук.-техн. конф. молодих вчених та студ. Київ: НТУУ "КПІ", 2016. С. 62-65. (Здобувачем виконано аналітичні розрахунки зміни кінематичних кутів мітчика в залежності від форми передньої поверхні та проведено експериментальні дослідження.)*

16. Тарган Д.В., Майборода В.С., Мусіюк О.Б. Вплив магнітно-абразивного оброблення на якісні характеристики мітчиків із швидкорізальної сталі. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матер. Міжнародної наук.-техн. конф. (30 травня – 1 червня 2017р). Краматорськ: ДДМА, 2017. С. 89. (Здобувачем проведено експериментальну роботу та визначено вплив вертикального розташування мітчиків в робочій зоні верстату на мікрогеометрію та фізико-механічні характеристики робочих поверхонь.)*

17. Тарган Д.В., Майборода В.С. Вплив магнітно-абразивного оброблення на твердість та структурні параметри матеріалу мітчиків. *Сучасні технології промислового комплексу: матер. міжнарод. наук.-практ. конф. (12-17 вересня 2017 р., випуск 3). Херсон: ХНТУ, 2017. С. 224-225. (Здобувачем запропонована методика дослідження твердості по глибині матеріалу робочої частини мітчиків, проведено вимірювання та аналіз результатів.)*

18. Мусіюк О.Б., Тарган Д.В., Майборода В.С. Магнітно-абразивне

оброблення мітчиків з вертикальним розташуванням в робочій зоні. Матер. Всеукраїнської наук.-техн. конф. молодих вчених та студ. *«Інновації молоді – машинобудуванню 2017»*, секція *«Інтегровані технології машинобудування»*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 3 с. URL: <http://s-konf.mmi.kpi.ua/imm2017/paper/view/7904>. (Здобувачем виконано експериментальні дослідження.)

19. Мусіюк О.Б., Тарган Д.В., Майборода В.С. Дослідження твердості по глибині та структури матеріалу мітчиків після магнітно-абразивного оброблення. Матер. Всеукраїнської наук.-техн. конф. молодих вчених та студ. *«Інновації молоді – машинобудуванню 2017»*, секція *«Інтегровані технології машинобудування»*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 3 с. URL: <http://s-konf.mmi.kpi.ua/imm2017/paper/view/7906>. (Здобувачем запропонована методика дослідження твердості по глибині матеріалу робочої частини мітчиків, проведено вимірювання твердості.)

20. Тарган Д.В., Майборода В.С., Джулій Д.Ю. Перекриття досліджуваної точки робочої частини мітчика при магнітно-абразивному обробленні. Матер. Всеукраїнської наук.-техн. конф. молодих вчених та студ. *«Інновації молоді – машинобудуванню 2017»*, секція *«Інтегровані технології машинобудування»*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 2 с. URL: <http://s-konf.mmi.kpi.ua/imm2017/paper/view/7908>. (Здобувачем виконано графічне та математичне моделювання процесу МАО мітчиків та визначено зону «перекривання».)

21. Тарган Д.В., Майборода В.С., Слободянюк І.В. Дослідження градієнту магнітного поля в робочій зоні верстату для магнітно-абразивного оброблення. Матер. Всеукраїнської наук.-техн. конф. молодих вчених та студ. *«Інновації молоді – машинобудуванню 2017»*, секція *«Інтегровані технології машинобудування»*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 2 с. URL: <http://s-konf.mmi.kpi.ua/imm2017/paper/view/7910>. (Здобувачем виконано вимірювання магнітної індукції в робочій зоні верстату та аналіз результатів замірів.)

22. Особливості формування магнітно-абразивного інструменту /

І.В. Слободянюк, В.С. Майборода, Д.Ю. Джулій, Д.В. Тарган. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку*: матер. Міжнародної наук.-техн. конф. (29-31 травня 2018 р). Краматорськ: ДДМА, 2018. С. 80. *(Здобувачем виконано експериментальні дослідження.)*

23. Тарган Д.В., Майборода В.С. Вплив розташування мітчиків в робочій зоні верстату на параметри якості їх робочих поверхонь при магнітно-абразивному обробленні. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*: матер. тез доповідей VIII міжнародної наук.-практ. конф. (м. Чернігів, 10–12 травня 2018 р.): у 2-х т. Чернігів: ЧНТУ, 2018. Т. 1. С. 137-138. *(Здобувачем виконано експериментальні дослідження та визначено вплив кута нахилу мітчиків на параметри якості інструменту.)*

24. Тарган Д.В., Майборода В.С., Слободянюк І.В. Експериментальне визначення зон «перекривання» зубців мітчика при магнітно-абразивному обробленні. Матер. Всеукраїнської наук.-техн. конф. молодих вчених та студ. «Інновації молоді – машинобудуванню 2018». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 2с. URL: <http://s-konf.mmi.kpi.ua/imm2018/paper/view/13352>. *(Здобувачем запропонована методика оцінки інтенсивності оброблення робочих поверхонь мітчиків та проведено експериментальні дослідження.)*

25. Вплив магнітної індукції на швидкість обертання деталей / Д.В. Тарган, І.В. Слободянюк, Д.Ю. Джулій, В.С. Майборода. *Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво*. Матер. міжнародної наук.-практ. конф. (31 жовтня — 02 листопада 2018 р). Краматорськ: ДДМА, 2018. С. 179-181. *(Здобувачем виконано аналіз результатів вимірювань швидкості обертання.)*

26. Вплив магнітно-абразивного оброблення на точність мітчиків M12 із швидкорізальної сталі / Д.В. Тарган, В.С. Майборода, І.В. Слободянюк, Д.Ю. Джулій. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку*: матер. Міжнародної наук.-техн. конф. (4-7 червня 2019 р). Краматорськ: ДДМА, 2019. С. 114. *(Здобувачем виконано експериментальні дослідження та аналіз результатів вимірювань.)*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	23
ВСТУП.....	24
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МІТЧИКІВ ТА НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В ГАЛУЗІ ФІНІШНИХ МЕТОДІВ ОБРОБЛЕННЯ ОСЬОВОГО РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ. ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	30
1.1. Аналіз методів утворення внутрішніх різьбових поверхонь.....	30
1.2. Аналіз особливостей нарізання різьби мітчиками.....	34
1.3. Основні параметри якості мітчиків.....	37
1.4. Аналіз фінішних методів оброблення осьового різального інструменту.....	40
1.5. Висновки. Мета та задачі дослідження.....	56
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ УМОВ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОГО ОБРОБЛЕННЯ МІТЧИКІВ В РОБОЧІЙ ЗОНІ КІЛЬЦЕВОГО ТИПУ	59
2.1. Математична модель процесу МАО мітчиків.....	60
2.2. Визначення зон «перекривання»	64
2.3. Визначення інтегральної інтенсивності оброблення	68
2.4. Висновки	73
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	75
3.1. Матеріали досліджень	75
3.2. Обладнання для МАО та режими оброблення.....	75
3.3. Магнітно-абразивні матеріали, що використовували при МАО.....	79
3.4. Вимірювання шорсткості робочих поверхонь мітчиків.....	82
3.5. Вимірювання поверхневої твердості та дюрOMETричний аналіз матеріалу	85

3.6. Вимірювання радіусів округлення різальних кромок	87
3.7. Вимірювання точності мітчиків	88
3.8. Методика досліджень силових характеристик нарізання різьби	89
3.9. Методика досліджень мітчиків на стійкість.....	90
РОЗДІЛ 4 ВПЛИВ МАО НА МІКРОГЕОМЕТРІЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ МІТЧИКІВ	93
4.1. Режими магнітно-абразивного оброблення мітчиків	93
4.2. Експериментальне дослідження інтенсивності оброблення	96
4.3. Вплив МАО на шорсткість робочих поверхонь мітчиків	98
4.3.1. Формування шорсткості залежно від типу магнітно-абразивного матеріалу	99
4.3.2. Вплив кута нахилу мітчиків p на величину шорсткості поверхонь	101
4.4. Вплив МАО на радіус округлення різальних кромок мітчиків.....	107
4.5. Вплив МАО на поверхневу твердість мітчиків	110
4.5.1. Вплив типу магнітно-абразивного матеріалу на твердість робочих поверхонь.....	111
4.5.2. Вплив кута нахилу мітчиків p на твердість робочих поверхонь	112
4.6. Вплив магнітно-абразивного оброблення на зміну твердості по глибині та структуру матеріалу мітчиків	115
4.7. Вплив магнітно-абразивного оброблення на точність мітчиків	121
4.8. Висновки	125
РОЗДІЛ 5 ВПЛИВ МАО НА РОБОТОЗДАТНІСТЬ МІТЧИКІВ.....	129
5.1. Вплив МАО мітчиків на силові характеристики процесу нарізання різьби.....	129

5.2. Вплив процесу МАО на стійкість мітчиків при експлуатації	131
5.3. Висновки	138
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	140
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	144
ДОДАТОК А.....	158
ДОДАТОК Б	160

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

1. Скорочення

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ВСЕ – відновлюючий стрижневий елемент;

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;

МАІ – магнітно-абразивний інструмент;

МАО – магнітно-абразивне оброблення;

МАП – магнітно-абразивний порошок;

МОТС – мастильно-оходжуюче технологічне середовище;

РІ – різальний інструмент;

РК – різальна кромка;

ЧПК – чисельне програмне керування

2. Умовні позначення

V_B – швидкість головного руху (лінійна швидкість руху оправки вздовж робочої зони), м/хв;

ω_O – частота обертання оправки навколо власної осі, об/хв;

ω_B – частота обертання оправки навколо осі кільцевої ванни, об/хв;

R_{ϵ} – радіус кільцевої ванни, мм;

r – радіус округлення РК різального інструменту, мкм;

B – магнітна індукція, Тл;

S – подача, мм/об;

HV – твердість за Віккерсом, ГПа;

Ra – параметр шорсткості поверхні, мкм;

p – кут базування оброблюваної деталі відносно площини робочої зони (відносно вектора головного руху), градуси;

q – кут базування оброблюваної деталі відносно дотичної площини до кільцевої ванни, градуси.

ВСТУП

Актуальність роботи. В сучасному виробництві підвищення ефективності технологічного процесу, який безперечно залежить від якості різального інструменту є актуальним завданням. При формоутворенні внутрішніх різьбових поверхонь, виникають проблеми, пов'язані з низькою роботоздатністю інструменту та особливостями процесу. Якість мітчиків та будь-якого РІ в значній мірі залежить від стану мікрогеометрії різальних кромок та робочих поверхонь, та від фізико-механічних характеристик поверхневих шарів матеріалу інструменту.

Зазначені параметри якості інструменту як правило формуються на фінішних етапах його виготовлення. На сьогоднішній день існує велика кількість способів забезпечення відповідних вищенаведених характеристик мітчиків, але жоден із них не вирішує цю проблему в комплексі. А саме, окремі методи дозволяють позитивно впливати на мікрогеометричні параметри робочих поверхонь без суттєвої зміни фізико-механічних властивостей поверхневого шару. Інші – навпаки, дозволяють отримати підвищену твердість, але погіршують шорсткість поверхонь РІ.

Зважаючи на те, що різальні мітчики є основним методом формоутворення внутрішніх різьбових поверхонь і більшу їх частину виготовляють із швидкорізальної сталі, виникає потреба підвищення якості даного інструменту. Одним із варіантів вирішення зазначених проблем є використання перспективного методу магнітно-абразивного оброблення (МАО), який показав позитивні результати для таких різальних інструментів із швидкорізальної сталі як розвертки, свердла, кінцеві фрези. Інформація про використання методу МАО для фінішного оброблення мітчиків – інструменту, який має складну просторову форму і працює в умовах стисненого різання суттєво обмежена. Особливо актуальним, зважаючи на умови експлуатації, є забезпечення як раціональної мікрогеометрії робочих елементів мітчиків, так і фізико-механічних характеристик, що прогнозовано забезпечить підвищення роботоздатності.

Дослідження та аналіз особливостей процесу МАО мітчиків із швидкорізальної сталі дозволить контролювано і комплексно керувати параметрами якості інструменту з метою підвищення його роботоздатності.

У зв'язку з вищесказаним, підвищення якості мітчиків із швидкорізальної сталі є актуальною науковою проблемою і має велике практичне значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами.

Дисертаційна робота виконувалася відповідно до наукового напрямку "Фінішні методи магнітно-абразивного оброблення виробів складної конфігурації і процеси формоутворення порошкового магнітно-абразивного інструменту в умовах великих магнітних щілин" на кафедрі конструювання машин КПІ ім. Ігоря Сікорського. Результати дисертаційної роботи використані при виконанні держбюджетних НДР "Основи теорії проектування різальних інструментів для високошвидкісної обробки" (№ державної реєстрації 01150002354) та "Комп'ютерно-інтегровані системи проектування та виготовлення складних фасонних поверхонь на основі сучасних процесів формоутворення" (№ державної реєстрації 0118U002071).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є забезпечення підвищеної роботоздатності мітчиків із швидкорізальної сталі шляхом керування його якістю за рахунок формування радіусів округлення різальних кромek, мікрогеометрії робочих поверхонь та їх фізико-механічних властивостей магнітно-абразивним обробленням на верстатах з кільцевим розташуванням робочої зони.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

1. Виконати аналіз фінішних методів оброблення осьових різальних інструментів, що забезпечують формування параметрів його якості.
2. Визначити закономірності контактної взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваними поверхнями при МАО мітчиків шляхом математичного моделювання різних умов процесу та обґрунтувати вибір раціональних параметрів оброблення для керованого впливу на

мікрогеометричні та фізико-механічні параметри поверхневого шару інструменту.

3. Встановити основні закономірності формування мікрогеометрії поверхонь та різальних кромок, зміни фізико-механічних властивостей матеріалу та поверхневих шарів мітчиків із швидкорізальної сталі в залежності від параметрів процесу МАО мітчиків на верстатах з кільцевим розташуванням робочої зони.

4. Дослідити вплив технологічних параметрів процесу МАО мітчиків на особливості зміни геометричних розмірів їх робочої частини.

5. Експериментально підтвердити достовірність результатів аналітичних розрахунків та практичних досліджень впливу МАО на параметри якості мітчиків та зробити оцінку їх ефективності в умовах промислового виробництва.

6. Розробити рекомендації щодо застосування методу МАО мітчиків із швидкорізальної сталі на верстатах з кільцевим розташуванням робочої зони.

Об'єкт дослідження. Магнітно-абразивне оброблення мітчиків із швидкорізальної сталі на верстатах з кільцевим розташуванням робочої зони.

Предмет досліджень. Підвищення роботоздатності мітчиків із швидкорізальної сталі методом МАО.

Методи дослідження. В роботі використано основні положення матеріалознавства, теорії різання матеріалів, механіки контактної взаємодії, трибології, математичного моделювання, математичної статистики. Експериментальні дослідження виконано в лабораторних та виробничих умовах з використанням сучасних методик та засобів вимірювання.

Наукова новизна одержаних результатів.

Розроблено експериментально-теоретичні положення для забезпечення підвищення якості та роботоздатності мітчиків із швидкорізальної сталі магнітно-абразивним методом на верстатах з кільцевим розташуванням робочої зони:

1. Вперше розроблено геометричну та математичну модель МАО мітчиків різних діаметрів та форми з кутом профілю 60° на верстатах з кільцевим розташуванням робочої зони, що враховує особливості взаємодії оброблюваних поверхонь з магнітно-абразивним інструментом та дозволяє визначити раціональні умови оброблення для прогнозованого забезпечення мікрогеометрії робочих поверхонь і фізико-механічних властивостей поверхневого шару інструменту.

2. Вперше встановлені закономірності впливу умов розташування мітчиків в робочій зоні верстату на ефективне оброблення їх робочих поверхонь з урахуванням утворення тіньових зон та зон «перекривання» зубцями мітчика в процесі МАО.

3. Вперше встановлено особливості впливу умов МАО на показники експлуатаційної стійкості, характер зносу робочих поверхонь мітчиків із швидкорізальної сталі в лабораторних умовах та умовах реального виробництва.

Практичне значення отриманих результатів.

Розроблено науково-практичні засади підвищення параметрів якості та роботоздатності мітчиків із швидкорізальної сталі за рахунок використання на фінішних етапах їх виготовлення методу МАО. Визначено технологічні режими та умови оброблення мітчиків, що забезпечують якісне рівномірне та продуктивне полірування робочих поверхонь, формування мікро- та макрогеометрії РК, видалення завусенок, мікроконцентраторів напружень у вигляді задирок, виливів матеріалу, отриманих на попередніх операціях виготовлення РІ робочих поверхнях та підвищення фізико-механічних властивостей поверхневих шарів.

Доведена доцільність проведення попереднього геометричного та математичного моделювання процесу МАО, які враховують рух мітчиків в робочій зоні верстату та особливості взаємодії елементів МАІ з оброблюваними поверхнями, для визначення раціональних кутів базування мітчиків в робочій зоні верстату та інтенсивності оброблення робочих поверхонь. Розроблено

рекомендації щодо раціональних умов оброблення, типу МАП, його форми та розмірів з метою забезпечення заданих параметрів якості інструменту.

Запропоновано метод підготовки поверхні шліфів на робочих елементах мітчиків і методику досліджень по визначенню зміни твердості матеріалу і його мікроструктурних характеристик в залежності від відстані від поверхні. Визначено вплив умов MAO на зміну твердості по глибині матеріалу мітчиків.

Результати роботи по застосуванню запропонованої технології підвищення якості та роботоздатності мітчиків із швидкорізальної сталі було використано на підприємстві «Група компаній «Веда», що дозволило знизити їх витрати у 1,5-2 рази. Проведено спільні дослідження і отриманні результати роботи використано на фірмі ZOM Oberflächenbearbeitung GmbH, Німеччина, що дозволило виконувати прогнозоване оброблення мітчиків та отримати необхідні параметри їх якості. Результати роботи впроваджено в навчальний процес кафедри інтегрованих технологій машинобудування при викладанні курсу «Методи та обладнання для підвищення працездатності різального інструменту».

Особистий внесок здобувача. Автором сформульовано мету та задачі, що вирішуються в дисертаційній роботі. Запропоновано геометричну та математичну модель для визначення характеру взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваними поверхнями мітчиків на верстатах з кільцевим розташуванням робочої зони, яка враховує особливості складної просторової форми інструменту, дозволяє визначити ефективні умови процесу MAO та виконувати їх прогнозування. Виконано постановку роботи, методик та способів для досягнення поставленої мети, проведено розрахунки, експериментальні дослідження, аналіз та узагальнення отриманих результатів. Матеріали дисертаційної роботи не вміщують результати, що належать співавторам, з якими були написані роботи. В роботі наведені посилання на авторів і відповідні джерела при використанні відомих теоретичних положень та експериментальних даних.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертації доповідались та обговорювались на науково-технічних, науково-практичних конференціях та семінарах, серед яких основними є: XV, XVI, XVII міжнародних науково-технічних конференціях «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Краматорськ 30.05 – 01.06.2017, 29 – 31.05.2018, 04 – 07.05.2019), Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні технології промислового комплексу» (м. Херсон, 12 – 17.09.2017), VIII міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 10 – 12.05.2018), XIV Всеукраїнської науково-технічної конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (м. Суми, 27 – 31.10.2014), II всеукраїнська науково-технічна конференція «Прогресивні технології в машинобудуванні» (м. Львів 10.02 – 15.02.2014).

Публікації. За основними результатами дисертаційної роботи опубліковано 9 статей у провідних фахових виданнях в Україні та за кордоном. Результати дослідження також представлено в 17 тезах доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 133 найменувань на 14 сторінках та 2 додатків. Основний текст дисертації викладено на 120 друкованих сторінках, що містить 72 рисунки, 8 таблиць. Повний обсяг дисертації становить 166 сторінок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МІТЧИКІВ ТА НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В ГАЛУЗІ ФІНІШНИХ МЕТОДІВ ОБРОБЛЕННЯ ОСЬОВОГО РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ. ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Аналіз методів утворення внутрішніх різьбових поверхонь

В сучасній промисловості для деталей машин часто використовують роз'ємні конструкції, які забезпечують зручність їх збирання та розбирання, а також обслуговування. Такі конструкції мають високу ремонтпридатність та взаємозамінність деталей, що є вкрай важливо для складного обладнання, яке має довгий період експлуатації. Також часто необхідно виконувати з'єднання деталей із різних матеріалів, що в свою чергу мають різні фізико-механічні характеристики. В приладо- та машинобудуванні існує достатньо методів отримання з'єднань, але найбільш широке застосування отримали різьбові. Їх частка становить 60-80% [55] (рис. 1.1).

До переваг таких з'єднань відносять:

- високу надійність;
- технологічність;
- можливість регулювання сили затягу та створення високих осьових навантажень при відносно низьких зусиллях на інструменті;
- можливість фіксації в затягнутому стані;
- наявність великої номенклатури стандартних виробів;
- невисока вартість кріпильних деталей та ін.

Якість та працездатність різьбових з'єднань в більшості випадків залежить від якості та способу отримання внутрішньої різьби на кріпильних деталях. Формоутворення внутрішньої різьбової поверхні є складним технологічним процесом, особливо в глухих отворах та отворах малих діаметрів до 12-16 мм,

коли існує висока вірогідність втрати роботоздатності РІ і його руйнування, що призводить до бракування деталей на заключних етапах їх виготовлення.

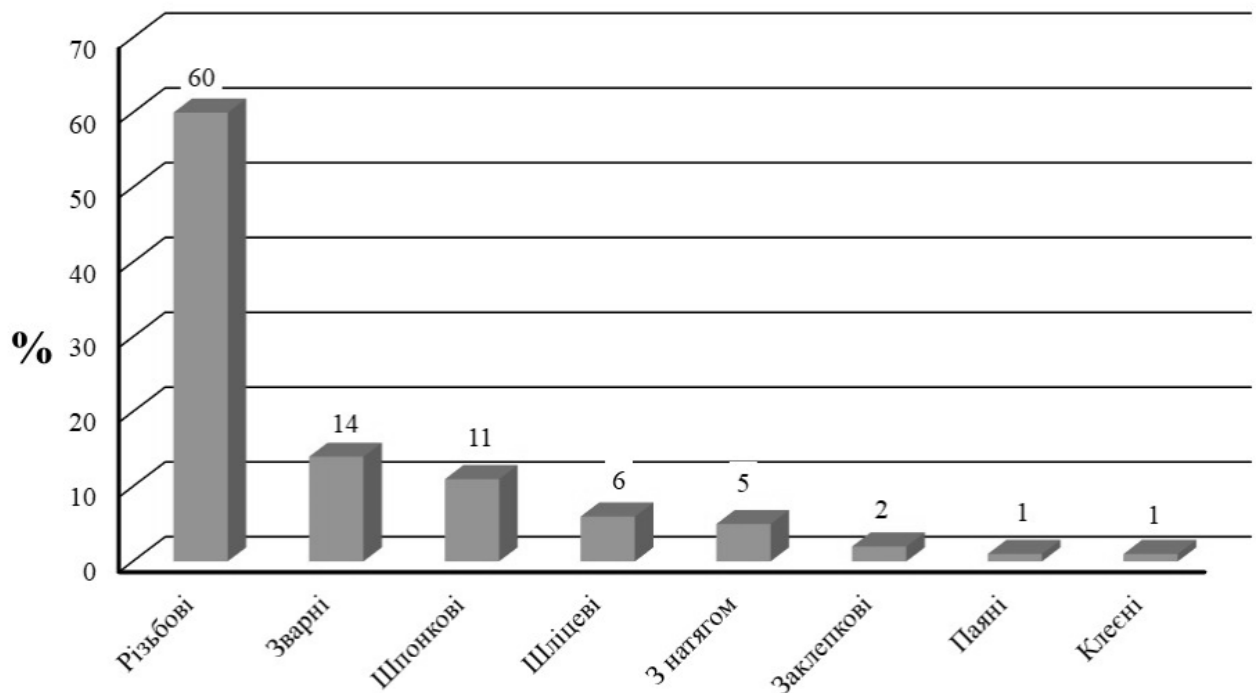


Рис. 1.1. Типи з'єднань, які використовують у промисловості

На рис. 1.2 представлено методи формоутворення внутрішніх різьбових поверхонь [81]. Аналіз наведеної схеми показує, що найчастіше використовують метод нарізання різьби мітчиками – до 90% випадків. Даний метод є однією із найпоширеніших технологічних операцій в машинобудуванні. Стандартна схема різьбонарізання – це передача поступального та обертального руху мітчику та обов'язково реверс для викручування мітчика з отвору. Мітчик забірною частиною послідовно зрізає стружку однакової товщини та різної ширини в канавці різьби, забезпечуючи формування профілю різьби. До основних переваг методу відносять можливість отримання різьби будь-якого розміру та профілю, нарізання різьби як у в'язких, так і у крихких матеріалах, нарізання різьби у тонкостінних деталях. Недоліками є порівняно низька якість нарізаної різьби, що залежить від якості і точності різального інструменту, в особливості від мікро- та макрогеометрії робочих елементів мітчиків, фізико-механічних характеристик поверхневих шарів.

Серед інших, менш розповсюджених технологій оброблення внутрішніх різьб, широко застосовують нарізання головками, точіння, фрезерування та накатування.

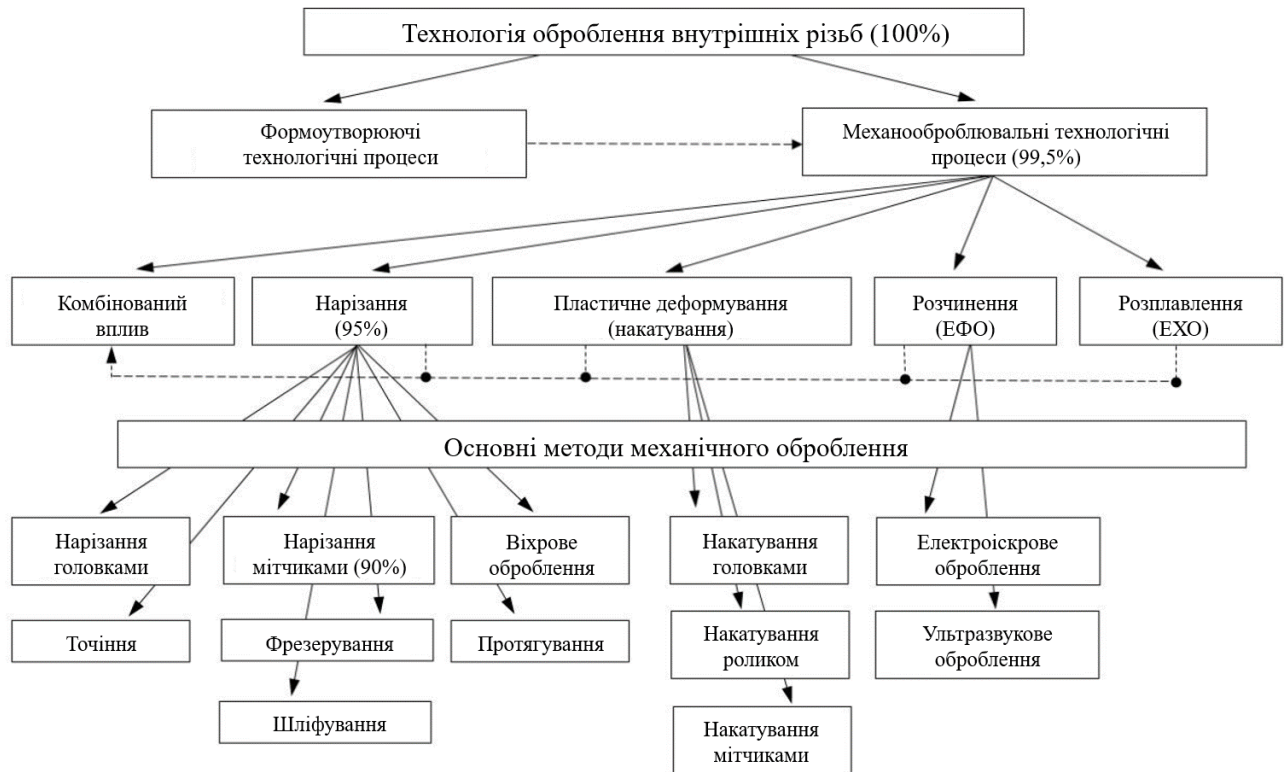


Рис. 1.2. Методи формоутворення внутрішніх різьбових поверхонь

Нарізання головками виконують при обробленні різьби діаметром від 36 мм до 300 мм. Після нарізання різьби, гребінці головок зсуваються і інструмент виводять із отвору. Нарізання головками може бути однопрохідним і багатопрохідним. В серійному виробництві при кроці різьби до 2 мм використовують однопрохідне нарізання, а для важкооброблюваних матеріалів і кроку різьби більше 2 мм використовують багатопрохідне. Метод високопродуктивний через відсутності необхідності повільно вигвинчувати інструмент із отвору. Головки є складним і менш жорстким інструментом в порівнянні з мітчиками, що не дозволяє нарізати різьбу високої точності. Основним недоліком цього методу є відсутність можливості нарізання різьби

малих та середніх діаметрів, які найчастіше використовуються у машинобудуванні і особливо приладобудуванні.

Точіння внутрішньої різьби виконують рідко, в основному для коротких різьбових поверхонь діаметром 20 мм і вище. Операція не забезпечує високу точність через консольне закріплення різця, його можливе відтиснення від деталі і наявність підвищених вібрацій при точінні.

Фрезерування внутрішньої різьби в останні роки набуло популярності у багатьох виробництвах. Це, в першу чергу, пов'язано з широким впровадженням в промислове виробництво верстатів з ЧПК, що дозволяють реалізувати кінематичну схему різьбофрезерування [45]. Основними перевагами такого методу є нарізання якісної різьби у важкооброблюваних матеріалах, де використання мітчиків призводить до забивання канавок стружкою і як наслідок поломки інструменту і бракування деталей. Важливо відзначити, що фрезеруванням можливо нарізати повнопрофільну різьбу біля дна глухого отвору. Якщо фреза зламається, її можна без проблем видалити із отвору. Недоліками різьбофрезерування є неточність профілю різьби через радіальний відгин інструменту від оброблюваної поверхні, вартість інструменту та його обслуговування, можливість використовувати тільки на трьохосьових верстатах з ЧПК. До того ж, через відсутність інформації по налаштуванню інструменту та технологічного процесу, багато часу та фінансів витрачається на додаткові операції.

Накатування різьби мітчиками використовують при обробленні в'язких матеріалів, таких як алюміній та його сплави, цинк і його сплави, інші кольорові метали, низьковуглецеві та деякі жаростійкі сплави. Різьба утворюється шляхом видавлювання в оброблюваному матеріалі без виділення стружки, що є одним із переваг методу. Накатана різьба характеризується підвищеною міцністю (до 20%), точністю та чистотою різьбових поверхонь [55, 81]. Мітчики для накатування різьби як правило складніші та дорожчі у виготовленні в порівнянні

із звичайними. Їх використання обмежується твердістю та крихкістю матеріалу. Метод не використовують у тонкостінних деталях та для утворення різьби несиметричного профілю. Для забезпечення повного профілю різьби, необхідно забезпечити точний діаметр отвору, в якому передбачається накатування.

Проаналізовані методи формоутворення внутрішніх різьбових поверхонь найчастіше використовуються на виробництві. Використання того чи іншого методу пов'язане із техніко-економічними показниками і можливостями підприємств, але серед них нарізання різьби мітчиками є основним та найбільш розповсюдженим у машинобудуванні. Накопичено великий досвід використання даного методу в технології виробництва, розроблено методичне та виробниче забезпечення. Не дивлячись на те, що фрезерування та накатування різьби стрімко розвиваються та займають все більший ринок, мітчики ще довгий час будуть основним та прогресивним інструментом для нарізання внутрішньої різьби, який потребує вдосконалення технологічних параметрів, що впливають на якість формування різьбових поверхонь, методів відновлення та підвищення працездатності.

1.2. Аналіз особливостей нарізання різьби мітчиками

В сучасній світовій науці існує багато інформації про фізичні процеси і явища, що відбуваються при утворенні різьбових поверхонь, але нарізання внутрішньої різьби мітчиками супроводжується низкою проблем та складнощів, вирішення яких є актуальним завданням і потребує дослідження нових методів.

Якісні характеристики, точність та міцність різьбових поверхонь забезпечуються різальним інструментом, режимами та умовами оброблення, МОТС [21, 30, 31, 47, 48, 51, 77, 78, 79, 81, 97, 116, 128, 132]. Неточність або пошкодження внутрішньої різьби, руйнування мітчика в процесі роботи приводить до бракування деталей та великих фінансових втрат. Тому виникає необхідність в удосконаленні процесу різьбонарізання та підвищенні якості

інструменту.

Особливості нарізання різьби мітчиками описані в роботах провідних вчених В.В. Матвєєва [46-49], В.І. Шагуна [77-79], А.А. Грудова [20-22], П.Р. Родіна [60] та ін. Результати їх досліджень сприяли подальшому розвитку теорії і практики отримання якісних внутрішніх різьбових поверхонь.

У промисловості найчастіше використовують метричну різьбу, яка є основним видом кріпильної різьби, тому найбільше уваги до технології виготовлення та підвищення якості приділяють саме їй. Внутрішня різьба має складну геометричну форму і відповідно багато параметрів, що контролюються стандартами [15-19]: середній діаметр, крок, кут профілю різьби, точність форми різьбової поверхні. Точність даних параметрів повинна забезпечуватися технологічним процесом, обладнанням та інструментом.

Мітчики працюють в несприятливих умовах. Силова взаємодія матеріалу деталі і різальних зубів викликає просторовий напружений стан і деформації кручення і вигину мітчика. Внаслідок цього, змінюється профіль різьби, збільшуються її геометричні розміри. В процесі нарізання різьби виникають проблеми з відведенням стружки із зони різання і підведення МОТС в зону контакту робочих поверхонь зубів і оброблюваного матеріалу, особливо при обробленні глухих отворів. Використання різних паст перед обробленням не дає належного ефекту, так як їх дія слабшає в міру входження робочої частини мітчика в отвір [7, 73]. При вигвинчуванні мітчика з отвору можливе сколювання різальних кромek та руйнування зубців через потрапляння під задню поверхню інструмента частинок стружки. Саме тому в процесі нарізання внутрішньої різьби мітчиками, важливу роль відіграють мікрогеометрія та стан поверхонь складнопрофільного інструменту.

Процес формування внутрішньої різьби складається з наступних етапів: врізання в отвір забірної частини мітчика, нарізання різьби на заданій довжині, зупинка мітчика та реверсне вигвинчування мітчика із отвору. Далі розглянемо

кожен етап окремо та особливості, які супроводжують процес.

На етапі врзання зубців забірної частини в отвір виникають крутні удари та сплески сил різання. При контакті різальних кромek зубців з оброблюваним матеріалом в останньому утворюється напружена зона, ущільнення матеріалу в пластично-деформованій зоні і його зріз. Аналіз крутних моментів показує, що сили на різальних кромках зростають імпульсивно від нуля до максимальних значень, а потім зменшуються до значень, що діють на різальних кромках при їх русі в оброблюваному матеріалі [7, 20, 49, 53, 54, 85]. Внаслідок цього, різальні кромки перших зубців забірного конуса сприймають високі динамічні навантаження, що може спричинити їх часткове викришування. Це призводить до зміни профілю нарізуваної різьби, збільшення навантаження на різальні кромки інших зубців, або навіть до руйнування мітчика.

На другому етапі різальні кромки зубців забірної частини та поверхні інструменту знаходяться у відносно тривалому контакті з оброблюваними поверхнями при більш високих напруженнях та силах тертя в зонах контакту. Саме на цьому етапі відбувається зношення інструменту, при чому окремі ділянки зубців схильні до різного зносу. Біля вершини зубця основним видом зносу є адгезійний, який проявляється у вигляді плям схоплювання і періодичному відриві дрібних частинок оброблюваного матеріалу і матеріалу інструмента. На задній поверхні зубців переважає абразивний знос, який є результатом тертя двох поверхонь та мікроподряпин від абразивної дії дрібних частинок, що відділяються від матеріалу.

В момент зупинки мітчика на етапі 3 в оброблюваній деталі залишаються частинки стружки, при нарізанні різьби в глухих отворах – стружки, яка ще не відокремилась від матеріалу деталі. Здеформований при різанні шар відновлюється і контактує з задніми поверхнями зубів інструменту. Виникає напружений стан пластичної зони, що призводить до посилення тиску на задні поверхні зубців мітчика та підвищується ймовірність схоплювання задніх

поверхонь зубців з оброблюваним матеріалом.

На етапі вигвинчування мітчика із отвору можливі сколи різальних кромок в результаті сил тиску на них з боку оброблюваного матеріалу. В разі попадання під задню поверхню частинок стружки існує вірогідність руйнування окремих зубців. Вигвинчування мітчика з оброблюваного отвору характеризується адгезійним і абразивним зносом задніх поверхонь зубців.

Сколи і викришування, які виникають на різальних кромках, призводять до зростання крутних моментів при обробленні наступних отворів, що може призводити до передчасного руйнування мітчиків.

Опір руйнуванню, адгезійному і абразивному зносу залежить від мікрогеометрії робочих поверхонь, міцності та фізико-механічних властивостей матеріалу мітчика, геометричних параметрів зубців та радіусу округлення різальних кромок. Таке представлення технологічного процесу нарізання різьби та факторів, що впливають на роботоздатність інструменту змушують детально розглянути можливі способи забезпечення параметрів якості мітчиків для підвищення їх стійкості та водночас забезпечити якість утвореної різьби.

1.3. Основні параметри якості мітчиків

Якість металорізального інструменту, що поставляється підприємствами різних країн регламентується державними та міжнародними стандартами у вигляді вимог до інструменту щодо зовнішнього вигляду, розмірів і допусків, матеріалу і твердості, випробувань в роботі, таврування і упаковки. Такі параметри якості в подальшому будуть безпосередньо впливати на стійкість та роботоздатність інструменту.

Для мітчиків основними параметрами якості є (рис. 1.3):

- склад, структура та наявність дефектів інструментального матеріалу;
- геометрія та точність робочої частини;
- твердість матеріалу та поверхневих шарів;

- чистота робочих поверхонь;
- мікрогеометрія різальних кромок.

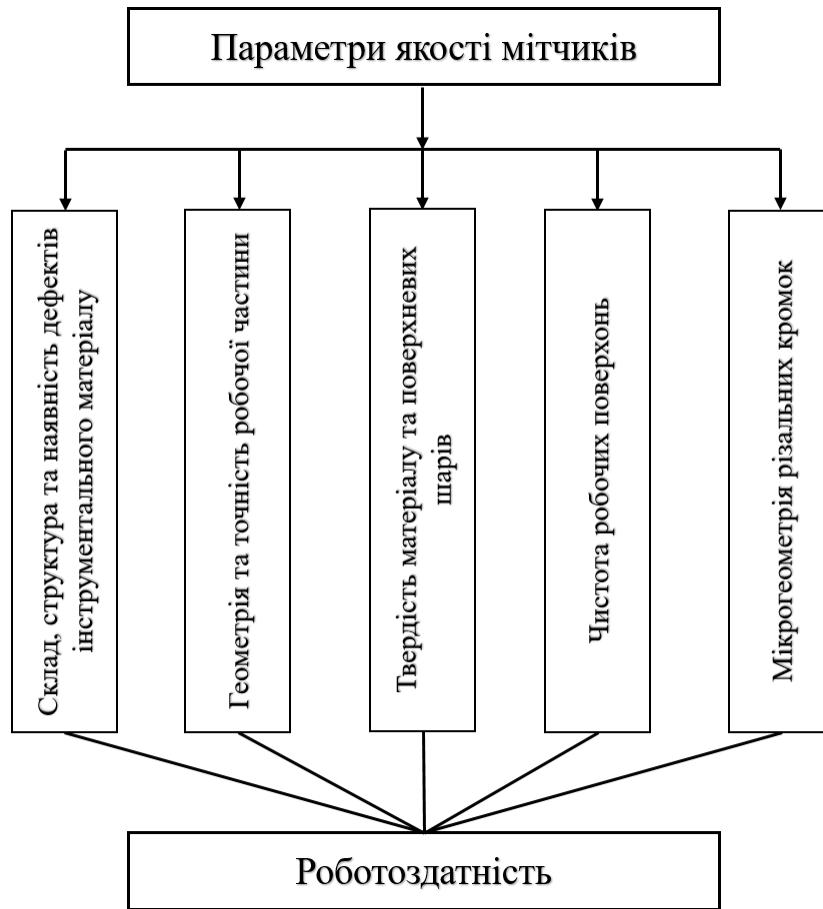


Рис. 1.3. Основні параметри якості мітчиків, що впливають на роботоздатність

Вибір інструментального матеріалу залежить від матеріалу та характеристик оброблюваної деталі, а також технологічних параметрів і режимів різання [28]. В сучасному виробництві для виготовлення мітчиків широко використовують леговані та швидкорізальні інструментальні сталі, різні тверді сплави. Швидкорізальні сталі є основним матеріалом для виробництва різального інструменту: їх частка становить близько 70%, на тверді сплави припадає близько 20% [33]. Тому підвищення параметрів якості мітчиків із швидкорізальної сталі є актуальним завданням. Також для підвищення зносостійкості на мітчики наносять спеціальні покриття [8, 32, 119]. Проте процес нанесення покриттів, як правило, призводить до погіршення

мікрогеометрії робочих поверхонь і потребує досить специфічної технології формування поверхні і поверхневого шару мітчиків перед нанесенням, в особливості РК.

Особливо важливим показником якості мітчиків після виготовлення є наявність поверхневих дефектів у вигляді тріщин або сколів, завусенок підвищеної жорсткості. При їх наявності інструмент руйнується на перших же хвилинах роботи.

На сьогоднішній день на ринку існує безліч конструкцій мітчиків, які відрізняють геометрією робочої частини, що включає кут нахилу забірного конуса φ , передній γ та задній α кути на різальних кромках, кут ω нахилу та форму стружкових канавок, кут нахилу різальної кромки λ , розташування зубців та цілісність конструкції. Таке різноманіття номенклатури викликане необхідністю забезпечити ефективність та продуктивність технологічного процесу нарізання різьби в різних матеріалах. Недотримання встановлених стандартами кутів, розмірів та допусків або спотворення форми зубців та різальних кромок призводить до поломки інструменту і бракування деталей [31, 79, 98].

Твердість матеріалу інструмента залежить від його складу та структури, яка формується при термічному обробленні. Твердість поверхневих шарів формується на фінішних етапах виготовлення інструменту та є дещо вищою ніж твердість основи за рахунок субструктурного і полікристалічного зміцнення [58]. Саме зазначені методи впливають на міцність та швидкість зношення інструменту. Недотримання технологічних режимів фінішного оброблення може призвести до зниження твердості поверхневих шарів матеріалу мітчиків, формування в них розтягуючих напружень, що найчастіше призводить до деформування різальних кромок та робочих поверхонь в процесі експлуатації, утворення тріщин і як наслідок до руйнування або заклинювання інструменту та бракування деталей [53, 54, 62].

Шорсткість робочих поверхонь мітчиків суттєво впливає на їх роботу та стійкість [30, 46, 122]. Передня поверхня постійно контактує із стружкою, яка видаляється з зони різання, а задня фрикційно взаємодіє з матеріалом оброблюваної деталі. Високі значення шорсткості на робочих поверхнях продукують підвищені сили різання та крутні моменти, що призводять до поломки мітчиків або швидкого їх зношення.

Експлуатаційні властивості мітчиків значно залежать від мікрогеометрії різальних кромek, яка визначається величиною радіусу округлення та формою [4, 89, 91, 95, 112, 130]. На них в процесі різання діють значні механічні та термічні навантаження. Гостра різальна кромка має низьку міцність та стійкість, при ударних навантаженнях, які присутні в різьбонарізанні, швидко сколюється та руйнується. Тому на фінішних етапах виготовлення інструменту необхідно сформувати радіус округлення та певну форму різальної кромки, що імітує захисну фаску, щоб вона могла виконувати свої функції та не втрачати властивості при робочих навантаженнях.

Більшість параметрів якості мітчиків формуються на фінішних етапах його виготовлення. В сучасному виробництві існує низка методів оброблення осьових різальних інструментів, за допомогою яких прагнуть отримати максимально позитивний вплив на параметри їх якості. Тому доцільно проаналізувати, які з методів можна ефективно використати для підвищення якості таких складнопрофільних інструментів як мітчики.

1.4. Аналіз фінішних методів оброблення осьового різального інструменту

До характеристик, що впливають на роботоздатність відносяться: напружений стан приповерхневого шару, твердість та градієнт її зміни по товщині поверхневого шару, шорсткість робочих поверхонь та їх макрогеометрія, мікрогеометрія РК, відсутність на них мікроконцентраторів

напружень у вигляді завусенок, викришувань та сколів. Зазначені параметри, як правило, формуються на фінішних етапах виготовлення. При цьому відбувається утворення необхідного напруженого стану приповерхневого та поверхневого шару робочих поверхонь за рахунок поверхневого мікропластичного деформування, що супроводжується збільшенням густини дислокацій, спотворення кристалічної решітки поверхневих шарів та ущільненням структури, підвищується твердість. Крім зміни фізико-механічних характеристик важливим є зниження шорсткості, формування радіусів округлення РК певної форми та розмірів [72].

Шліфування. На практиці одним із завершальних етапів виготовлення РІ є шліфування (рис. 1.4). Даний метод підвищення працездатності РІ, набув широкого розповсюдження за рахунок формування в тонкому поверхневому шарі при силовій та термічній взаємодії (особливо локальній), стискаючих напружень, величина яких залежить від умов оброблення [28].

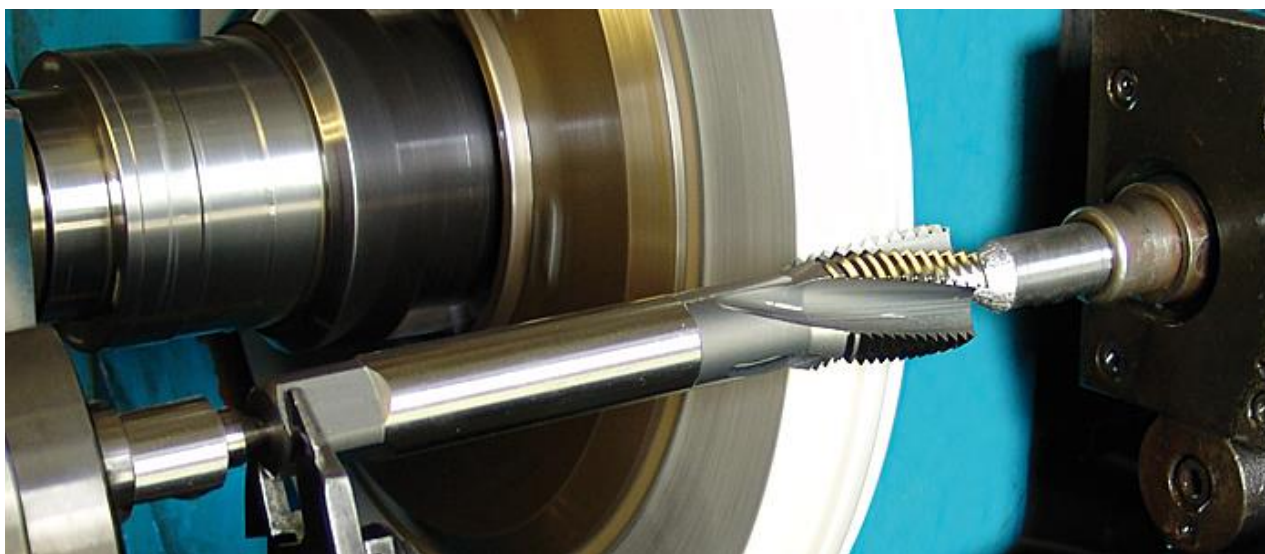


Рис. 1.4. Шліфування робочих поверхонь мітчика

Такі зміни зумовлюють зміцнення поверхневого шару, зростає втомна міцність, підвищується твердість поверхневого шару, що впливає на збільшення періоду стійкості РІ. Але при недотриманні режимів оброблення відбувається протилежний ефект і в поверхні формуються несприятливі розтягуючі

напруження, внаслідок чого можуть виникати мікротріщини, знижуватися межа міцності при згині і крученні.

Шліфування також використовується для формування фасок на різальних кромках інструменту, вони можуть бути як одинарні та подвійні, так і множинні з різноманітними симетричними та асиметричними формами, що повинно забезпечити не тільки їх стійкість, а й виключити утворення сколів та зазубрин при шліфуванні [93]. Але застосування шліфування кромки значно обмежене просторовою формою РІ та не може бути використане для складних просторових РК, до яких можна віднести мітчики.

Віброабразивне оброблення. Цей метод використовується для оброблення деталей широкої номенклатури і розмірів і застосовується для виконання таких операцій, як очищення литих заготовок; видалення облою; очищення від окалин і корозії; скруглення і полірування гострих кромки; очищення і оброблення поверхонь для нанесення покриття; поверхневий наклеп; зміна залишкових напружень.

Сутність вібраційної обробки складається в послідовному нанесенні на поверхні оброблюваних деталей великої кількості мікроударів частинками абразивного матеріалу під дією спрямованих вібрацій, що передаються робочої камері.

Знімання металу проводиться внаслідок механічного або механо-хімічного диспергування дрібних частинок металу з оброблюваної поверхні абразивними порошками. Під дією вібрації, деталі та абразивний матеріал починають інтенсивно відносно переміщуватися, здійснюючи два види рухів: коливання і повільне обертання масиву (циркуляційний рух).

В процесі оброблення деталі змінюють положення і проходять різні зони робочої камери, що забезпечує досить рівномірну обробку всіх поверхонь, формуються стискаючі напруження, які безпосередньо впливають на збільшення міцності, відбувається зниження шорсткості поверхонь, округлення РК, зникає

мікрорельєф від попередніх операцій шліфування [3].

Недоліком цього методу є неможливість контролювати форму округлення РК, складність оброблення записин різьби, утворення на різальних кромках сколів та виривів за рахунок численних ударів вібротіл по оброблюваних поверхнях та, особливо, РК, що значно знижує робочі властивості інструменту.

Об'ємне центробіжно-ротаційне оброблення. є одним із зміцнювальних методів. Він займає особливе місце серед відомих методів оброблення деталей в середовищі вільного абразиву. До основних переваг методу відносять [52, 65]: висока продуктивність; конструктивно просте обладнання; можливість одночасного оброблення великої партії деталей; можливість переходу від чорнової обробки до чистової шляхом зміни частоти обертання дна камери без зупинки процесу; можливість механізації і автоматизації допоміжних процесів і циклу оброблення.

Оброблення здійснюється за рахунок відносного переміщення і взаємодії робочого середовища і оброблюваних деталей. Таким чином можуть оброблятися деталі різної геометричної форми і розмірів.

Даний метод дозволяє досягти шорсткості поверхні $Ra = 0,28-0,35$ мкм, в залежності від оброблюваного матеріалу, при початковій шорсткості $Ra = 0,8-1,2$ мкм [65]. Найбільш інтенсивне зниження шорсткості поверхні відбувається в перші 30-40 с оброблення [52]. Подальше зниження шорсткості незалежно від тривалості обробки не відбувається, формується однотонна поверхня без виражених слідів процесу.

Поряд з перевагами методу центробіжно-ротаційного оброблення, йому притаманні такі недоліки: високий рівень зносу робочого середовища і внутрішніх стінок робочої камери; неможливість оброблення деталей складної просторової форми; можливість деформації деталей малої жорсткості; складність оброблення деталей масою > 100 г, відбувається розшарування - деталі знаходяться внизу, абразивна маса - вгорі.

Перераховані недоліки стримують широке впровадження цього методу оброблення вільним абразивом.

Струменево-абразивне оброблення. Для фінішного оброблення РІ використовують струменево-абразивне оброблення [59] (рис. 1.5), яке широко застосовується для очищення від окалини, доведення деталей складної просторової форми, для зміцнення поверхонь та для підготовки поверхонь перед нанесенням зносостійких покриттів.

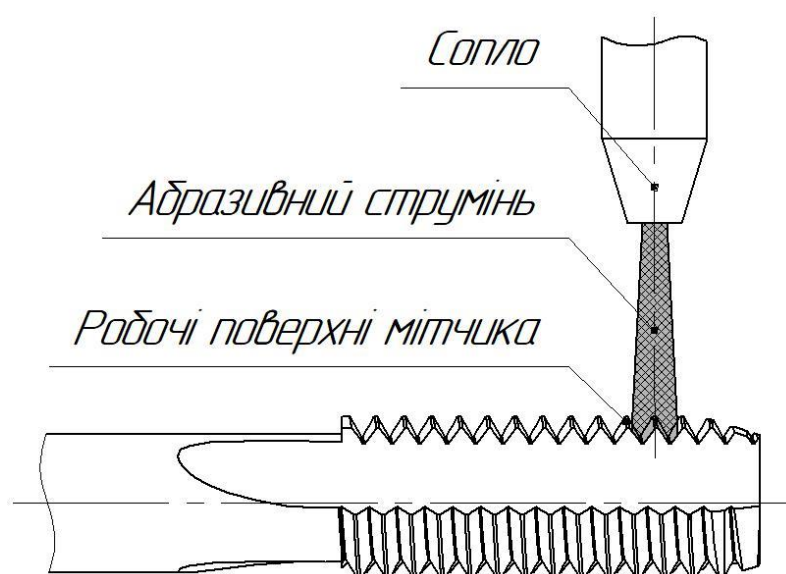


Рис. 1.5. Схема струменево-абразивного оброблення мітчика

Даний метод підвищує міцність та працездатність РІ [9]. Суть процесу струменево-абразивного оброблення полягає в тому, що на оброблювану поверхню або РК діє зі значною швидкістю струмінь абразивних зерен, які виконують зміцнення поверхні та зміну її мікрогеометрії. Оброблення відбувається завдяки наданню абразивним зернам великої кінетичної енергії, що забезпечує як мікропластичне деформування, так і видалення мікростружки. Кінетична енергія зернам надається за рахунок несучого середовища, яким може бути рідина або повітря. Також частинкам може надаватись енергія за рахунок відцентрових сил. В такому випадку оброблення називається дробеметним, при цьому поверхня бомбардується сферичними частинками, які називаються дріб.

В якості оброблюваного матеріалу може використовуватись металевий, скляний, керамічний та льодяний дріб.

Струменево-абразивне оброблення залежить від типу абразивного матеріалу, форми та розміру зерен, тиску потоку, кута спряження потоку та оброблюваних поверхонь. Як і при попередніх схемах, в поверхневих шарах РІ утворюються залишкові стискаючі напруження, відбувається наклепування, що сприяє зниженню ймовірності зародження тріщин втоми при експлуатації. Процес малоефективний при обробленні деталей складної просторової форми через направлену дію потоку на поверхні деталей. Для запобігання даному недоліку необхідно використовувати декілька різнонаправлених струменів або задавати йому складну траєкторію руху, що значно ускладнює конструкцію устаткування. Відзначимо, що на РК можуть утворюватись сколювання, викришування в результаті постійних мікроударів зерен по оброблюваній поверхні. Складним є контролювання зміни форми РК, також даний метод оброблення поверхонь може приводити до погіршення їх шорсткості, що негативно впливає на якість виробів. У випадках застосування запропонованого методу оброблення в якості підготовчої операції перед нанесенням зносостійких покриттів, можливе зниження якості покриттів і самих виробів в результаті утворення на поверхнях РІ локальних концентраторів напружень [9].

Турбоабразивне оброблення. Турбоабразивне оброблення дозволяє видаляти задирки, знімати окалину після термообробки, округлювати гострі кромки, готувати поверхні деталі під покриття.

Спосіб заснований на створенні абразивного киплячого (псевдозріженого) шару, в який занурюють оброблювану деталь, задаючи в залежності від її форми різні види руху (обертальний, планетарний та ін.).

Киплячий шар створюється наступним чином. У ємність, дном якої служить газорозподільна решітка, насипають шар абразивного зерна, потім через розподільну решітку подають знизу вгору потік повітря. Відбувається

урівноваження твердих абразивних частинок аеродинамічним тиском, при цьому шар набуває властивостей рідини, стає в'язким і текучим.

Процес оброблення відбувається за рахунок контактної взаємодії абразивних частинок з поверхнею металу. Значне збільшення інтенсивності знімання металу досягається шляхом надання деталі обертового або планетарного руху навколо власної ос. В такому випадку інтенсивність знімання металу набагато вища, ніж при нерухомому положенні.

Оброблення може проводитися при горизонтальному розташуванні шпинделя і односторонньому обертанні деталі, або при вертикальному положенні шпинделя і реверсивному обертанні деталі.

Спосіб успішно застосовується для фінішного оброблення нежорстких, легкодеформованих деталей. При збільшенні швидкості переміщення деталі понад 20 м/с відбувається утворення біля поверхонь деталі повітряного шару, що перешкоджає зіткненню абразивних зерен з оброблюваною поверхнею. Тому цей спосіб отримав обмежене застосування при високих вимогах до якості поверхні, особливо загартованих деталей. Після турбоабразивного оброблення поверхня має кратероподібний мікрорельєф, що складається з великої кількості коротких подряпин, які створюють матову поверхню.

Оброблення абразивними щітками. Оброблення абразивними щітками використовується для видалення задирок, окалин, видалення матеріалу, підвищення міцності, зносостійкості та корозійної стійкості поверхонь, для видалення мікрокапельної структури після нанесення зносостійких покриттів, а також для оброблення РК інструменту [87, 94]. В якості оброблюваного інструменту використовують щітки у формі дисків, коліс або чашок [87, 89]. Абразивні щітки складаються з полімерних ниток і можуть містити в собі абразивний матеріал. Під час оброблення, нитки взаємодіють з лезом інструменту, чим досягається зняття матеріалу та утворення радіусу округлення РК. В результаті ударів волокон по оброблюваних елементах в поверхневому

шарі утворюються стискаючі напруження. На ефективність процесу впливає швидкість оброблення, зернистість абразивного матеріалу, позиціонування щітки відносно пластини, глибина занурення оброблюваної поверхні в щітку та загальний час оброблення.

Значний вплив на кінцевий результат має стан ниток, оскільки при їх зношенні зменшується величина видалення матеріалу. Для виправлення даного недоліку збільшують час оброблення, що в свою чергу призводить до підвищення температури [87].

Оброблення абразивними щітками є високопродуктивним та ефективним методом оброблення різального інструменту, виготовленого з різних матеріалів, але тим не менше він має ряд недоліків. В процесі експлуатації зношуються волокна, що приводить до погіршення властивостей інструменту і, відповідно, до суттєвого збільшення різниці між отриманими значеннями величин радіусів округлення РК. Також до недоліків можна віднести нерівномірність оброблення внаслідок складності попадання окремих волокон в напіввідкриті поверхні з малими розмірами, і в результаті можливе утворення тіньових зон, в яких процес або не проходить взагалі, або відбувається неефективно. Крім того, може відбуватись засалювання щітки, що знижує ефективність процесу.

Оброблення у вільному абразиві. Оброблення у вільному абразиві відоме як тягове шліфування – це сучасний метод шліфування РІ, яке здійснюється у вільному абразиві геометрично невизначеним шліфувальним інструментом, ущільненим інерційними силами [26]. Зовнішній вигляд верстату для оброблення осьового РІ у вільному абразиві представлено на рис. 1.6.

Оброблювані деталі занурюються в контейнер, що містить вільні абразивні зерна, якими можуть бути керамічні матеріали, карбід силіцію, корунд, мелена шкаралупа волоського горіху та ін. В процесі деталі здійснюють планетарний рух в абразивному середовищі з метою забезпечення рівномірного оброблення та полірування поверхонь. Тягове шліфування може здійснюватись в умовах

сухого та вологого оброблення. Під час процесу деталі не контактують між собою на відміну від віброабразивного методу.



Рис. 1.6. Верстат для оброблення осьового РІ у вільному абразиві

Оброблення залежить від властивостей оброблюваного матеріалу та матеріалу середовища, від швидкості та напрямку відносного переміщення деталей в робочій зоні, від глибини занурення оброблюваного інструменту в абразивне середовище, а також від загального часу оброблення [86]. Даний метод використовується для округлення РК на складнопрофільному інструменті такому як свердла, кінцеві та черв'ячні фрези та зміцнення поверхневих шарів робочих частин [121].

Даний метод має ряд недоліків. Під час оброблення різні частини довгомірних деталей знаходяться на різній глибині в робочому середовищі, що супроводжується різними величинами сил, які діють на ці оброблювані елементи. Це спричиняє нерівномірне оброблення по довжині деталей.

Методи нанесення зносостійких покриттів. Широкого розповсюдження для підвищення працездатності РІ набули методи нанесення зносостійких

покриттів [106]. Для підвищення ефективності експлуатації робочих поверхонь, на них наносять різноманітні матеріали та сплави. В більшості випадків працездатність РІ залежить саме від властивостей поверхневих шарів, які пошкоджуються в процесі експлуатації на багато раніше ніж основа [74]. Використання покриттів сприяє збільшенню терміну експлуатації РІ [32] за рахунок зміцнення поверхневого шару, збільшення твердості поверхонь, зниження температури безпосередньо в зоні різання. Розроблений цілий ряд способів та методів нанесення тонких зносостійких покриттів на робочі елементи РІ. Серед них найпоширенішими є: хіміко-термічне оброблення, іонне осадження покриттів, фізичне осадження покриттів (PVD), хімічне осадження покриттів (CVD).

Недоліками методу є формування небезпечної перехідної зони між покриттям та основою, в якій утворюються позитивні напруження, що сприяють сколюванню покриттів в процесі їх експлуатації [8]. Також відзначимо значне погіршення шорсткості поверхонь та значну тривалість і собівартість процесу, необхідність специфічної підготовки поверхонь виробів перед нанесенням покриття.

Магнітно-абразивне оброблення (МАО). Доцільно використовувати на фінішних етапах виготовлення різноманітних виробів [2, 5, 6, 41, 61, 72, 76, 83, 86, 99, 103, 108, 123-126, 131]. Даний метод відноситься до групи полірувально-зміцнювальних методів оброблення, і реалізується в середовищі магнітно-абразивного порошку (МАП), який в процесі оброблення формується магнітним полем в магнітно-абразивний інструмент (МАІ), при відносному русі оброблюваних деталей та порошкового магнітно-абразивного матеріалу. Метод МАО дозволяє комплексно впливати на стан поверхневого шару, змінюючи його фізико-механічні властивості та мікрогеометрію робочих поверхонь РІ, зокрема РК. При МАО РІ відбувається видалення задирок, полірування робочих поверхонь та РК, зміцнення поверхневого шару, формування в приповерхневому

шарі залишкових стискаючих напружень, підвищення корозійної стійкості, контактної втомної довговічності. Дані зміни відбуваються за рахунок мікрорізання та пластичного деформування. При МАО локальні температури не перевищують 200°C , відбувається активне відведення мікростружки з зони різання, тим самим запобігаючи засалюванню МАІ, відбувається "м'який" вплив на оброблювані поверхні, активно перемішуються абразивні зерна, забезпечуючи постійну стабільну різальну здатність. Також до переваг МАО віднесемо можливість керованого регулювання жорсткості МАІ в широких межах, що забезпечує різне зусилля його притиснення до оброблюваних поверхонь.

Метод магнітно-абразивного оброблення реалізується в значній кількості схем оброблення (понад 300), які відрізняються одна від іншої рядом параметрів. Відомо кілька підходів до класифікації методів і схем магнітно-абразивного оброблення:

- відносними рухами оброблюваних деталей в зонах оброблення [61];
- видами оброблюваних поверхонь [40, 57];
- функціональному використанню енергії магнітного поля [5].

Для МАО деталей типу тіл обертання застосовується схема, що передбачає жорстке кріплення оброблюваної заготовки в центрах між роликами консольно до полюсів постійних магнітів так, щоб між полюсами і оброблюваною поверхнею залишалися зазори, які заповнюються магнітно-абразивним порошком (рис. 1.7) [2, 5, 6, 41, 61, 72].

При цьому, полюсні наконечники магнітної системи, в залежності від габаритів оброблюваної деталі, можуть розташовуватися або з однієї сторони деталі або з двох протилежних сторін.

Для оброблення осьового різального інструменту використовують схему, в якій деталь закріплюється нерухомо, а рух передається полюсам та катушці електромагнітів (рис. 1.8).

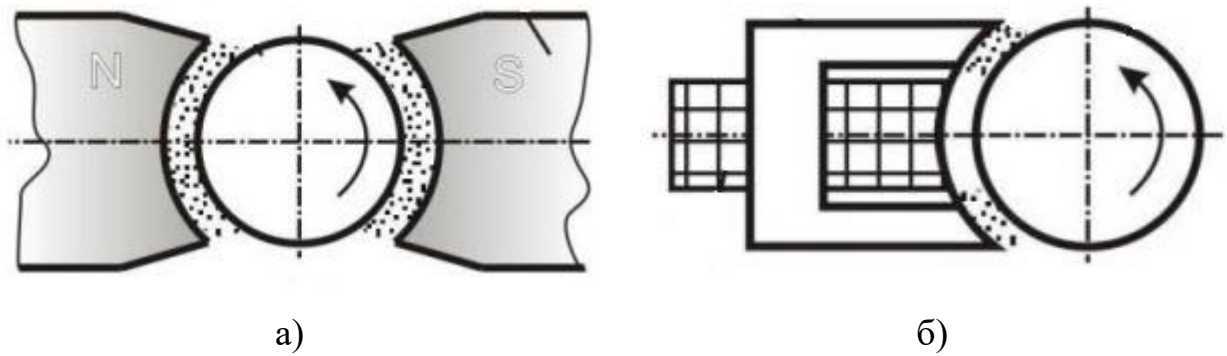


Рис. 1.7. Схема МАО циліндричних деталей з двостороннім (а) та одностороннім (б) розміщенням робочих зон



Рис. 1.8. Зовнішній вигляд установки з електромагнітною головкою [129]

В зазорі між полюсами формується робоча зона, в якій і утримується в робочому стані порошок.

Для оброблення деталей складної просторової форми, до яких відносяться мітчики, найбільше розповсюдження отримала схема, що містить кільцеву камеру і магнітну систему з магнітопроводом, обладнаним полюсними наконечниками, коаксіально розташованими з протилежних сторін камери, в якій формується МАІ і здійснює складний рух оброблювана деталь (рис. 1.9) [40, 41, 72].

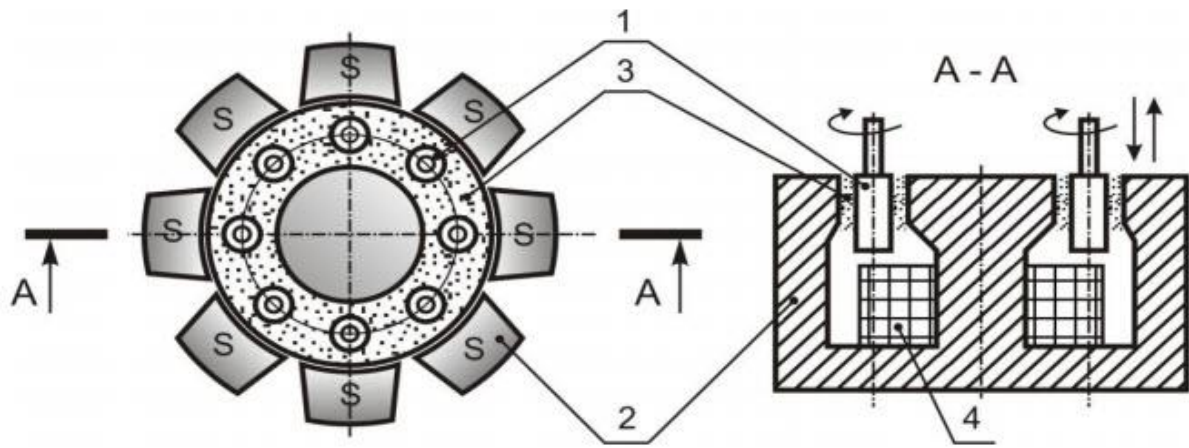


Рис. 1.9. Схема установки типу «кільцева ванна». 1 - заготовка, 2 – полюсні наконечники, 3 - магнітно-абразивний порошок, 4 - котушка електромагніта

Для МАО осьового РІ доцільно використовувати схему з великою робочою зоною кільцевого типу, оскільки РІ можуть мати складну просторову форму та значно відрізнятись по розмірах. При такій схемі оброблення МАІ нівелює в процесі МАО відносно поверхонь виробів і забезпечує ефективне і рівномірне оброблення незалежно від їх форми. Але для РІ, наприклад свердел, кінцевих фрез, мітчиків, для їх ефективного оброблення, необхідні різні умови базування деталей в міжполюсному просторі магнітних систем типу кільцева ванна [41, 70] і їх переміщення в робочій зоні. При цьому повинна реалізовуватися ідентична взаємодія МАІ з кожною окремою ділянкою робочих поверхонь інструменту і в особливості РК, і враховуватися тріботехнічні властивості магнітно-абразивних порошкових матеріалів [40, 63].

Проведені дослідження впливу МАО на показники якості оброблюваних поверхонь, на їх мікрогеометрію показали позитивний результат [27, 40, 41, 86]. Даний метод дозволяє обробляти як м'які та в'язкі, так і тверді матеріали, що значно розширює межі його використання.

В роботі [34] визначено, що шорсткість робочих поверхонь кінцевих фрез із швидкорізальної сталі після МАО зменшується в 3-4 рази, робочої частини

свердл із швидкорізальної сталі в 1,7 рази [35]. Відмічався також позитивний вплив на величину опорної поверхні мікропрофілю, що позитивно впливає на здатність протидіяти силовому та фрикційному навантаженню. В роботі [61] також відмічене збільшення опорної довжини профілю на 75 – 85 %.

Окрім шорсткості, МАО впливає на фізико-механічні властивості поверхневих шарів. В роботах [5, 9, 25, 41, 55, 64, 86, 99] визначено, що при обробленні осьового РІ відбувається значне його зміцнення. Після МАО формуються залишкові стискаючі напруження для швидкорізальної сталі величиною до 600-1200 МПа [5, 86, 40]. Поверхнева твердість робочих частин свердел із швидкорізальної сталі збільшується на 20 – 30%, а фрез на 13 – 16%. Мікроструктурний аналіз матеріалу інструментів, виготовлених із швидкорізальної сталі показує, що в поверхневому шарі матеріалу після МАО відсутні карбіди великих розмірів, а дрібнодисперсні розташовуються більш рівномірно [5, 64].

МАО РІ дозволяє формувати радіус округлення РК потрібної величини та форми [23, 40]. Величина радіусу округлення РК, яка є поверхнею безпосередньо контактуючою з матеріалом заготовки, і по якій йде процес відділення стружки, здійснює безпосередній вплив на складові сили різання та траєкторію руху матеріалу при різанні. Експериментально доведено, що для свердел з радіусом округлення РК, який складає 24 мкм, стійкість підвищується на 50-60% в порівнянні з необробленими [35].

Встановлено, що для різних інструментальних матеріалів та типів інструментів після МАО стійкість підвищується в 1,4 – 2,3 рази [23, 40, 41, 70, 71, 86]. Таким чином, метод МАО комплексно впливає на показники якості оброблюваних деталей, що забезпечує ефективне його використання при фінішному обробленні різальних інструментів.

Окремі дослідження процесу МАО мітчиків представлені в роботах [112, 130]. В них розглянуто можливість формування форми та радіусу округлення

різальних кромок мітчиків, описана важливість та вплив даного параметра на роботоздатність інструменту, а також проведена якісна оцінка чистоти поверхні після процесу МАО.

МАО мітчиків з малим робочим зазором та вплив технологічних факторів на якість робочих поверхонь досліджували в [75]. В роботі приведені залежності шорсткості, мікротвердості поверхневого шару, радіусу округлення різальних кромок та питомого зняття металу від таких параметрів як час оброблення, величина робочого зазору та зернистості магнітно-абразивного порошку. Отримані залежності в вузьких межах описують процес МАО мітчиків, адже на параметри якості інструменту суттєвий вплив мають швидкість руху МАІ, умови його контакту з оброблюваними поверхнями, тип магнітно-абразивного матеріалу. Зі збільшенням робочого зазору, величина питомого зняття матеріалу, а відповідно і параметри шорсткості та радіуси округлення будуть суттєво залежати від значення магнітної індукції в робочій зоні [40, 41]. Результати роботи можуть бути використані для схеми оброблення з малими робочими зазорами та не описують вплив МАО на роботоздатність мітчиків.

В роботі [5] проведено дослідження стійкості та впливу часу МАО мітчиків на радіуси округлення різальних кромок. Так, за час оброблення в 4 хв отримано радіуси округлення різальних кромок 37 мкм. Експериментальні дослідження стійкості показали, що мітчики із швидкорізальної сталі, оброблені методом МАО, нарізають на 60-90% більше різьб до критичного зносу ніж необроблені, а кількість сколів та викришувань зубців зменшується на 50-80%. Але не дивлячись на величезний вклад Барона Ю.М. в дослідження МАО різальних інструментів, в роботі відсутня інформація про вплив типу МАП та умов взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваними поверхнями на силові характеристики нарізання різьби, стійкість та характер зносу мітчиків.

Результати досліджень МАО мітчиків також представлено в роботі [30]. В рукописі автор вирішує проблему підвищення якості внутрішніх різьбових

поверхонь шляхом попереднього МАО мітчиків, тому основна увага спрямована на формування необхідних характеристик робочих поверхонь різьбонарізного інструменту та дослідження якості нарізаної різьби. Дослідження впливу МАО на такі параметри якості мітчиків як радіус округлення різальних кромek, шорсткість та мікротвердість робочих поверхонь проведено на основі існуючих досліджень та загальних рекомендації, приведених в [5, 57, 61]. Авторами виведена залежність шорсткості поверхні від таких параметрів як зернистість магнітно-абразивного порошку, магнітна індукція в робочій зоні та час оброблення, що відрізняється від залежності, приведеної в [75]. Це ще раз підтверджує той факт, що точно описати математичну залежність окремих параметрів оброблюваної деталі від умов методу МАО неможливо [5]. В роботі детально проаналізовано отримані результати впливу МАО на мікрогеометрію мітчиків, але мало уваги приділено впливу умов оброблення.

Не дивлячись на наявний досвід МАО мітчиків, в дослідженнях відсутній аналіз взаємодії квазістабільних об'ємів МАІ з оброблюваними поверхнями даного складнопрофільного інструменту. Немає обґрунтованої інформації щодо ефективних режимів оброблення мітчиків, та їх вплив на параметри якості інструменту. Оприлюднені результати стійкості мітчиків не враховують типу МАМ та умов, описаних вище, та не показують зміну силових характеристик при нарізанні різьби. Зважаючи на те, що при МАО відбувається певною мірою процеси мікрорізання і скобління, які супроводжуються зніманням матеріалу із заготовки, в літературі відсутня інформації про вплив даного методу на розмірну точність мітчиків.

Зважаючи на вищезазначене, дослідження процесу МАО мітчиків та його вплив на роботоздатність інструменту є актуальною проблемою, вирішення якої дозволить однозначно прогнозувати процес оброблення та гарантувати отримання необхідних показників якості та роботоздатності мітчиків.

1.5. Висновки. Мета та задачі дослідження

1. Різьбові з'єднання отримали широке використання в сучасному машино- та приладобудуванні. Їх частка становить 60-80% від загальної кількості з'єднань.

2. Працездатність та надійність різьбових з'єднань залежить від якості інструменту, режимів та умов формоутворення різьбових поверхонь.

3. Найбільш поширеним методом утворення внутрішньої різьби є нарізання мітчиками – близько 90% від загальної кількості механооброблювальних технологічних методів.

4. Нарізання різьби мітчиками проходить в несприятливих умовах і характеризується високими крутними моментами та силами різання, швидким зношенням, викришуванням зубців та руйнуванням інструменту, що пов'язано із особливостями процесу.

5. В результаті руйнування в процесі роботи виходить з ладу близько 50% мітчиків, що призводить до бракування деталей та зменшення продуктивності виробництва. Для досягнення необхідної якості різьби збільшують кількість мітчиків в комплекті або вводять додаткове калібрування різьби, що приводить до зниження продуктивності.

6. Сили та моменти різання, опір руйнуванню, адгезійному і абразивному зносу мітчиків залежить від якості інструмента. Основними параметрами якості мітчиків є: склад, структура та наявність дефектів інструментального матеріалу; геометрія та точність робочої частини; твердість матеріалу та поверхневих шарів; чистота робочих поверхонь; мікрогеометрія різальних кромek. Ці параметри якості безпосередньо впливають на стійкість та роботоздатність інструменту, а також на якість нарізаної різьби.

7. Більшу частину мітчиків, близько 70%, виготовляють із швидкорізальної сталі, яка є основним матеріалом в інструментальному

виробництві та має необхідні характеристики для більшості технологічних операцій.

8. На фінішних етапах виготовлення мітчиків формується більша частина параметрів його якості. Із великої кількості сучасних методів фінішного оброблення осьових різальних інструментів виділяється магнітно-абразивний, який забезпечує контрольований комплексний вплив на мікрогеометрію різальних кромek та робочих поверхонь, а також на фізико-механічні властивості матеріалу, в особливості поверхневих шарів. Метод показав позитивні результати для таких інструментів як розвертки, свердла, фрези.

9. Хоча на теперішній час існують дослідження процесу МАО мітчиків, залишаються відкритими питання впливу умов оброблення інструменту та характер взаємодії МАІ з оброблюваними поверхнями на параметри якості та роботоздатності мітчиків. При комплексному дослідженні, геометричному та математичному моделюванні процесу та обґрунтуванні технологічних параметрів МАО можна вирішити актуальну задачу підвищення якості мітчиків.

Зважаючи на зазначене, сформульовано мету та задачі дослідження.

Мета роботи – забезпечення підвищеної роботоздатності мітчиків із швидкорізальної сталі шляхом керування його якістю за рахунок формування радіусів округлення різальних кромek, мікрогеометрії робочих поверхонь та їх фізико-механічних властивостей магнітно-абразивним обробленням на верстатах з кільцевим розташуванням робочої зони.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

1. Виконати аналіз фінішних методів оброблення осьових різальних інструментів, що забезпечують формування параметрів його якості.

2. Визначити закономірності контактної взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваними поверхнями при МАО мітчиків шляхом математичного моделювання різних умов процесу та обґрунтувати вибір раціональних параметрів оброблення для керованого впливу на

мікрогеометричні та фізико-механічні параметри поверхневого шару інструменту.

3. Встановити основні закономірності формування мікрогеометрії поверхонь та різальних кромок, зміни фізико-механічних властивостей матеріалу та поверхневих шарів мітчиків із швидкорізальної сталі в залежності від параметрів процесу МАО мітчиків на верстатах з кільцевим розташуванням робочої зони.

4. Дослідити вплив технологічних параметрів процесу МАО мітчиків на особливості зміни геометричних розмірів їх робочої частини.

5. Експериментально підтвердити достовірність результатів аналітичних розрахунків та практичних досліджень впливу МАО на параметри якості мітчиків та зробити оцінку їх ефективності в умовах промислового виробництва.

6. Розробити рекомендації щодо застосування методу МАО мітчиків із швидкорізальної сталі на верстатах з кільцевим розташуванням робочої зони.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ УМОВ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОГО ОБРОБЛЕННЯ МІТЧИКІВ В РОБОЧІЙ ЗОНІ КІЛЬЦЕВОГО ТИПУ

Геометрія робочої частини мітчиків, в особливості різальної кромки, має складну просторову форму. Режими та умови МАО мітчиків будуть суттєво відрізнятися від режимів оброблення інших різальних інструментів [41]. Особливості базування мітчиків в робочій зоні верстату, швидкість обертання, величина магнітної індукції, тип та фракція магнітно-абразивного порошку мають великий вплив на показники якості інструменту.

Якість оброблення деталей при МАО на верстатах з кільцевим розташуванням робочої зони залежить від відтворення трьох основних умов: наявності достатньої нормальної складової взаємодії квазістабільних об'ємів МАІ з оброблюваною поверхнею; наявності відповідної тангенціальної складової для рівномірного полірування всіх поверхонь; ефективне перемішування зерен МАІ з метою постійного оновлення різальних кромки та видалення стружки в результаті мікрорізання [38]. При цьому найбільш впливовим є наявність і співвідношення відповідних складових сил взаємодії МАІ з оброблюваними поверхнями. Кількісна оцінка зазначених параметрів дозволить прогнозувати вірогідний вплив базування мітчиків в робочій зоні на якість та характер оброблення їх робочих поверхонь.

Інформація про дослідження впливу базування та швидкості обертання мітчиків в процесі МАО на інтенсивність та якість оброблення їх складних поверхонь відсутня. В роботах [14, 23, 102, 105, 107, 111] наведено методику і окремі результати моделювання процесу та визначення параметрів МАО, які впливають на якість поверхонь. Удосконалення методики розрахунку, яка спрямована на визначення інтенсивності оброблення робочих поверхонь мітчиків в залежності від таких параметрів як розташування в робочій зоні верстату та швидкості обертання, дозволить виконувати прогнозування і

оптимізацію методу МАО даного інструменту.

2.1. Математична модель процесу МАО мітчиків

При розробленні математичної моделі процесу МАО мітчиків на верстатах з великими магнітними зазорами і кільцевим розташуванням робочої зони необхідно враховувати особливості процесу оброблення і технічні можливості верстатів. Наявність великих магнітних зазорів, необхідних для особливого розташування і руху оброблюваного інструменту в робочій зоні вводить обмеження на величину магнітної індукції, яку можна отримати в зоні оброблення. Так в [40, 41] показано, що при обробленні можливо отримати величину магнітної індукції не більше 0,32 – 0,38 Тл. Тому ефективність та інтенсивність процесу оброблення буде перш за все визначатися динамічними чинниками – швидкістю переміщення оброблюваних поверхонь відносно магнітно-абразивного інструменту, що формується в процесі МАО і траєкторією руху оброблюваних поверхонь в МАІ. Безпосередньо інтенсивність оброблення робочих поверхонь мітчиків буде визначатися складовими швидкості взаємодії окремих груп зерен МАП, сформованих в квазістабільні об'єми з окремими ділянками оброблюваного інструменту.

В попередніх дослідженнях [14, 23, 34] для оцінки процесу МАО було введено параметр інтегральної інтенсивності оброблення таких виробів як свердла, багатогранні непереточувані твердосплавні пластини, лопатки газотурбінних двигунів. Проте для мітчиків необхідні розрахунки відсутні. Варто відзначити і той факт, що попередні дослідження були проведені на виробах відносно «простої» форми і не потребували ретельного аналізу інтенсивності оброблення ділянок поверхонь деталей, які знаходяться в «тіньових зонах» або перекривають один одного при МАО, тобто ділянках, де співвідношення нормальної і тангенціальної складових відносного руху МАІ та інструменту несприятливе для ефективного оброблення.

Було розроблено математичну модель процесу МАО мітчиків з кутом профілю різьби 60° розроблена для верстатів з кільцевим розташуванням робочої зони. Модель розроблено для визначення нормальної V_n та тангенціальної V_t вірогідних складових швидкості руху окремих представницьких квазістабільних об'ємів магнітно-абразивного інструменту, що контактують з оброблюваною поверхнею в кожній досліджуваній точці робочої частини мітчика та виявлення специфічних зон при обробленні. Схема позиціонування мітчиків на верстаті даного типу наведено на рис. 2.1.

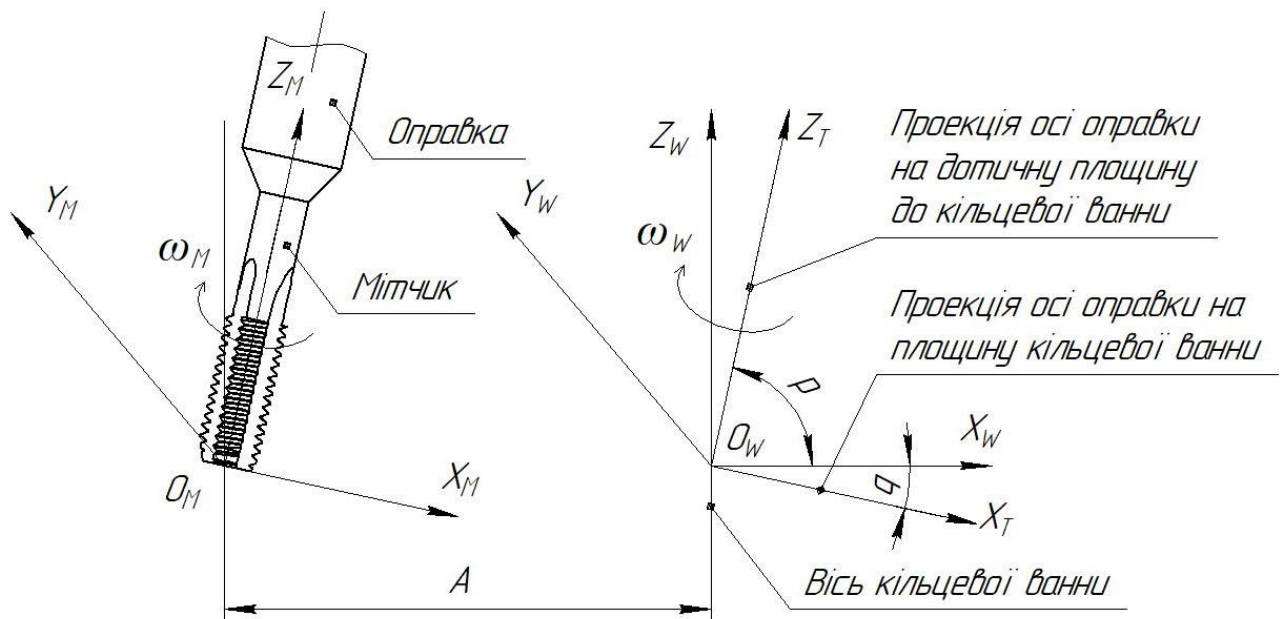


Рис. 2.1. Схема позиціонування мітчика на верстаті з кільцевим розташуванням робочої зони

На схемі p – кут нахилу оправки, який вимірюється в дотичній площині до площини робочої зони верстату, q – кут повороту оправки відносно дотичної до кільцевої робочої зони. Для математичного моделювання процесу МАО, вводимо системи координат:

- система координат $X_W Y_W Z_W$ пов'язана із кільцевою робочою зоною і обертається з частотою ω_W навколо осі Z_W ;
- система координат $X_M Y_M Z_M$ пов'язана з оправкою. Вісь Z_M є віссю обертання оправки. Дана система координат повернута навколо осі Y_W на кут p ,

а також навколо вертикальної осі Z_W на кут q , що дозволяє нахилити мітчик на довільний кут в робочій зоні. Система координат $X_M Y_M Z_M$ зміщена відносно вертикальної осі Z_W робочої зони верстату на величину A – радіус середньої частини кільцевої ванни;

- система координат $X_T Y_T Z_T$ пов'язана з оброблюваним мітчиком і обертається зі швидкістю ω_M навколо осі Z_M .

Задаємо координати точки P на поверхні мітчика та напрямок вектора нормалі N до поверхні в даній точці:

$$P = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

$$N = \begin{pmatrix} Nx \\ Ny \\ Nz \end{pmatrix}$$

Для визначення координат заданої точки P та напрямок вектора нормалі N в системі координат оправки при повороті мітчика навколо власної осі на кут ε використовуємо матрицю повороту вектора на кут $M(\varepsilon)$:

$$M(\varepsilon) = \begin{pmatrix} \cos \varepsilon & -\sin \varepsilon & 0 \\ \sin \varepsilon & \cos \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$P_M = M(\varepsilon) \cdot P$$

$$N_M = M(\varepsilon) \cdot N$$

Координати заданої точки P та напрямок вектора нормалі N в системі координат кільцевої ванни при нахилі оправки на кут p та повороті на кут q визначаємо як:

$$M(p) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin p & -\cos p \\ 0 & \cos p & \sin p \end{pmatrix}$$

$$M(q) = \begin{pmatrix} \cos q & -\sin q & 0 \\ \sin q & \cos q & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$P_W = M(p) \cdot M(q) \cdot P_M + A$$

$$N_W = M(p) \cdot M(q) \cdot N_M$$

де $M(p)$ – матриця повороту вектора на кут p ;

$M(q)$ – матриця повороту вектора на кут q ;

A – радіус кільцевої ванни.

Визначаємо швидкість руху точки навколо осі кільцевої ванни V_W :

$$R_W = \begin{bmatrix} (P_W)_0 \\ (P_W)_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$V_W = w_W \times R_W$$

де R_W – відстань від заданої точки на робочій поверхні мітчика до осі Z_W кільцевої ванни.

Визначаємо лінійну швидкість руху точки навколо осі оправки V_M :

$$R_M = \begin{bmatrix} (P_M)_0 \\ (P_M)_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$V_M = M(p) \cdot M(q) \cdot (w_M \times R_M)$$

де R_M – відстань від точки до осі Z_M оправки.

Абсолютна швидкість руху точки V визначаємо як:

$$V = V_W + V_M$$

Кут β між вектором швидкості та вектором нормалі до поверхні в конкретній точці робочої поверхні визначаємо як:

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{V \cdot N_W}{|V| \cdot |N_W|} \right)$$

Тоді величини нормальної V_n та тангенціальної V_t складових швидкості руху квазістабільних об'єктів МАІ в досліджуваній точці робочої поверхні мітчика:

$$V_n = |V| \cdot \cos \beta$$

$$V_\tau = |V| \cdot \sin \beta$$

Залежно від того, як направлені вектори швидкості можливого відносного переміщення квазістабільних об'ємів МАІ, що контактують з поверхнею мітчиків, можливий різний характер їх взаємодії. А саме, може відбуватися або переважний процес полірування, або процес зміцнення поверхневого шару, або взагалі оброблення буде відсутнє, коли поверхня інструмента розташована в «тіньовій» зоні. Це відбувається за умови, коли кут між вектором нормалі до поверхні, в якій лежить ця точка або ділянка, та між вектором швидкості V більший за 90° . Таким чином, активні складові швидкості, де $V_n > 0$ і $V_\tau > 0$ можна визначити як:

$$V_{nact}(\varepsilon) = |V| \cdot \cos(act\beta_n(\varepsilon)) \quad (2.1)$$

$$V_{\tau act}(\varepsilon) = |V| \cdot \sin(act\beta_\tau(\varepsilon)) \quad (2.2)$$

де $act\beta_n$ та $act\beta_\tau$ – це кути β , при яких відбувається ефективне оброблення поверхні.

Коли кут β знаходиться в межах $0-90^\circ$, то $act\beta_n$ та $act\beta_\tau$ рівні йому. В інших випадках $act\beta_n = \frac{\pi}{2}$, $act\beta_\tau = 0$.

2.2. Визначення зон «перекривання»

При МАО мітчиків під різними кутами p до площини робочої зони виникає ефект «перекривання» частини зубця та РК іншим зубцем, що знаходиться попереду (рис. 2.2-2.3).

В такій зоні відсутні $V_{nact}(\varepsilon)$ та $V_{\tau act}(\varepsilon)$, тому процес МАО неефективний. Для встановлення кількісної оцінки активних нормальної і тангенціальної складових швидкості оброблення робочих поверхонь мітчика необхідно визначити кути повороту інструменту навколо власної осі, при яких починається і закінчується зона «перекривання» оброблюваних точок поверхні.

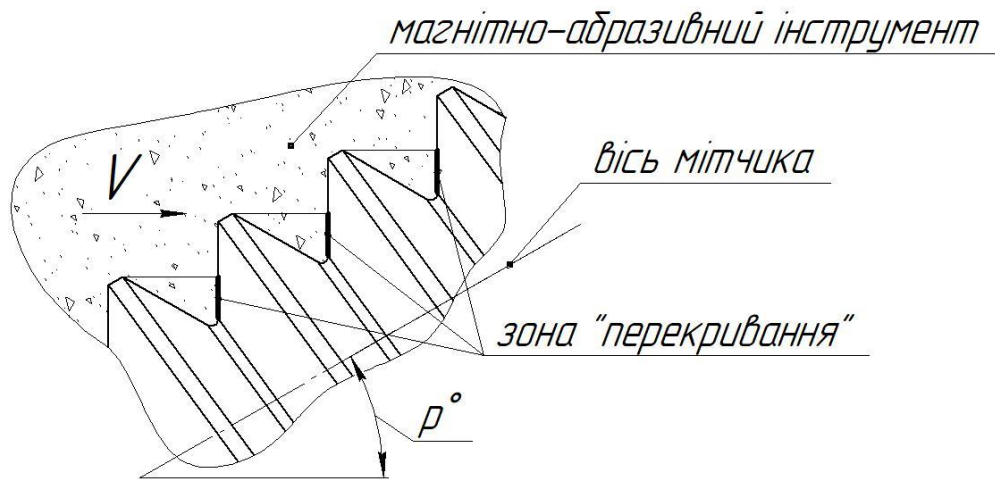


Рис. 2.2. Зони «перекривання» зубцями, що знаходяться попереду

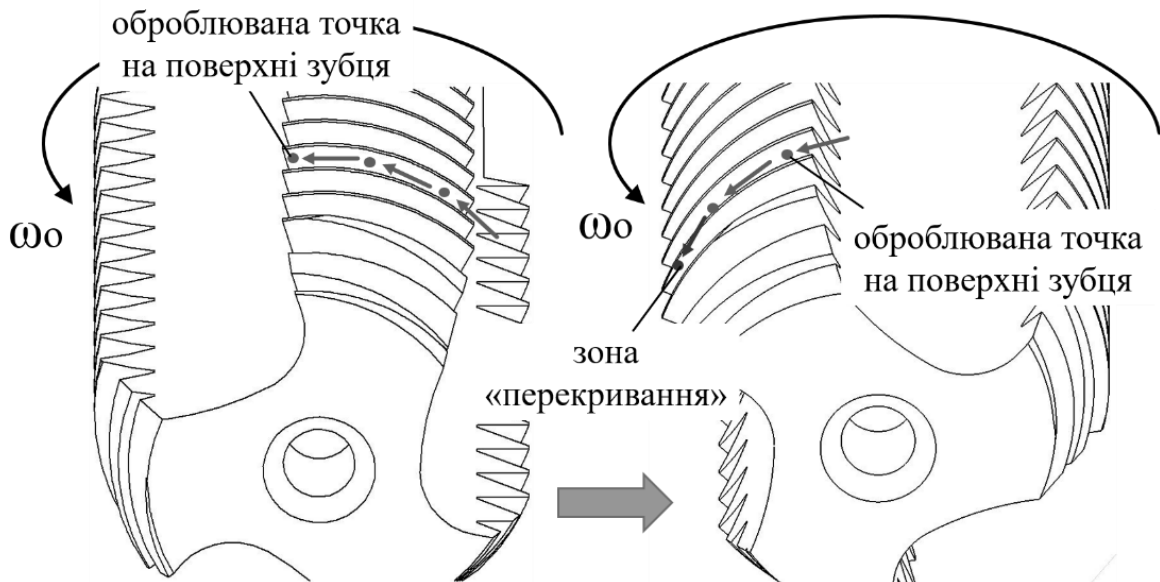


Рис. 2.3. Перехід точки на поверхні зубця у зону «перекривання»

Для визначення величини кута повороту мітчика φ , при якому оброблювана точка буде знаходитися в зоні «перекривання», було виконано графічне моделювання формування зони «перекривання» при МАО (рис. 2.4).

На площині P_1 представлено з торцевої поверхні інструменту діаметр мітчика D та діаметр d , на якому знаходиться досліджувана точка. В площинах P_2 і P_3 вищезгадані діаметри графічним моделюванням представлені під кутом ρ до площини робочої зони верстату. На рисунку R – радіус зубця робочої частини

мітчика, який перекриває в процесі оброблення наступний зубець, r – радіус на поверхні зубця, що перекривається, на якому знаходиться досліджувана точка поверхні, a – відстань від вершини зубця, що перекриває до площини, перпендикулярної осі мітчика, на якій заходиться досліджувана точка.

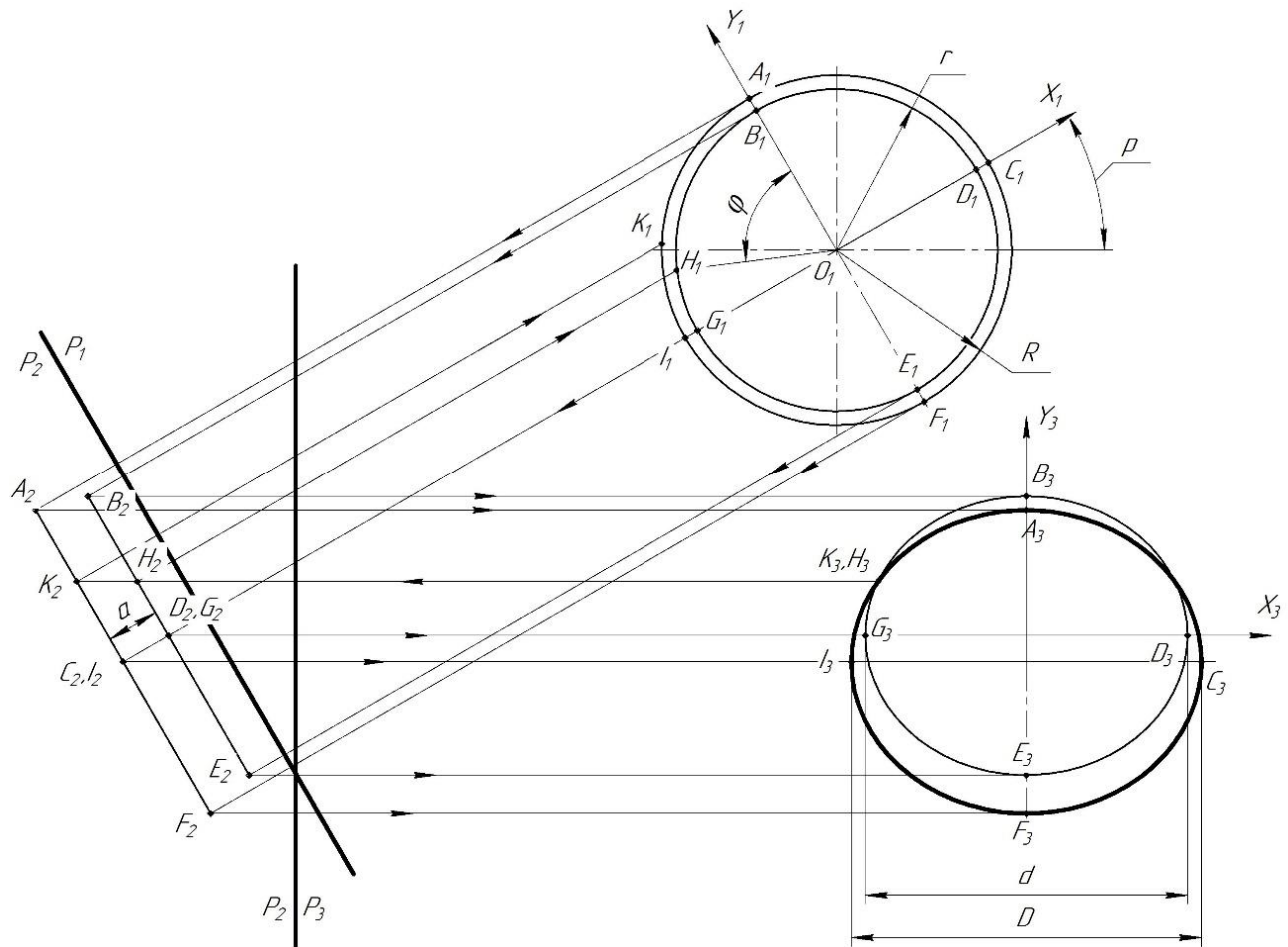


Рис. 2.4. Графічне моделювання зони «перекривання»

При обробленні під кутом p до площини робочої зони, «перекривання» досліджуваної точки на поверхні починається у точці H_3 і закінчується у точці, симетричній H_3 відносно осі Y_3 .

Для визначення координат точки початку «перекривання» H_3 в системі координат X_3Y_3 необхідно знайти точку перетину двох еліпсів. Для цього використаємо рівняння цих еліпсів:

$$\frac{X_3^2}{R^2} + \frac{(Y_3 + a \cdot \sin p)^2}{(R \cdot \cos p)^2} = 1 \quad (2.3)$$

$$\frac{X_3^2}{r^2} + \frac{Y_3^2}{(r \cdot \cos p)^2} = 1 \quad (2.4)$$

Вирішуючи систему рівнянь з (2.3) і (2.4), отримуємо координати точки початку «перекривання» в системі координат X_3Y_3 і знаходимо координати точки початку «перекривання» H_I в системі координат X_IY_I :

$$X_1 = X_3$$

$$Y_1 = \frac{Y_3}{\cos p}$$

Щоб знайти, на який кут φ необхідно повернути мітчик, щоб точка поверхні потрапила в зону «перекривання», знаходимо кут між віссю $\overrightarrow{O_1Y_1}$ та вектором $\overrightarrow{O_1H_1}$:

$$\cos \varphi = \frac{\overrightarrow{O_1Y_1} \cdot \overrightarrow{O_1H_1}}{|\overrightarrow{O_1Y_1}| \cdot |\overrightarrow{O_1H_1}|}$$

$$\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{\overrightarrow{O_1Y_1} \cdot \overrightarrow{O_1H_1}}{|\overrightarrow{O_1Y_1}| \cdot |\overrightarrow{O_1H_1}|} \right)$$

При MAO з розташуванням мітчиків під деяким кутом до площини робочої зони p , перекривання оброблюваної точки зубця починається при повороті мітчика навколо власної осі на визначений кут φ та закінчується при досягненні кута повороту $(360^\circ - \varphi)$.

Зазначимо, що необхідно врахувати випадки, коли система рівнянь (2.3, 2.4) не має розв'язку, тобто, коли оброблювана точка завжди знаходиться в зоні «перекривання» або ніколи туди не попаде. Це можливо за умов, коли кут розташування мітчиків в робочій зоні верстату p близький до граничних 0° або 90° .

Таким чином, враховуючи наявність «тіньової» зони та зони

«перекривання», можна визначити активні нормальні та тангенціальні складові швидкості руху квазістабільних об'ємів МАІ відносно задньої поверхні мітчиків. В досліджуваній точці при повороті мітчика на $\varphi \leq \varepsilon \leq (360^\circ - \varphi)$ $V_n act = 0$ та $V_t act = 0$, в інших випадках активні складові визначаються за (2.1, 2.2).

Для визначення характеру взаємодії квазістабільних об'ємів МАІ з оброблюваними елементами, вирахуємо інтегральну інтенсивність оброблення, як кількісну оцінку, що характеризує енергетичний аспект взаємодії зерен та їх груп з оброблюваними поверхнями за величинами $V_n act(\varepsilon)$ та $V_t act(\varepsilon)$. Вони визначаються, як сума активних швидкостей за окремою складовою для точки оброблюваної поверхні за повний оберт мітчика навколо власної осі:

$$IV_n = \int_0^{2\pi} V_n act(\varepsilon) d\varepsilon$$

$$IV_t = \int_0^{2\pi} V_t act(\varepsilon) d\varepsilon$$

За результатами розрахунків інтегральної інтенсивності оброблення за $V_n act(\varepsilon)$ та $V_t act(\varepsilon)$, можна прогнозувати переважаючий характер оброблення. Тому, для забезпечення ефективного оброблення необхідно керувати співвідношенням тангенціальних та нормальних складових сил взаємодії МАІ з робочими поверхнями мітчиків, які залежать від параметрів базування інструменту на верстатах з кільцевим розташуванням робочих зон.

Метод розрахунку інтегральних інтенсивностей оброблення актуальний для мітчиків будь-яких діаметрів з кутом профілю різьби 60° . Відношення IV_t до IV_n буде однаковим, незалежно від діаметру мітчиків.

2.3. Визначення інтегральної інтенсивності оброблення

Було розраховано інтегральні інтенсивності оброблення на задній поверхні мітчиків М10, виготовлених за [17] при різних величинах кута p . Точки, в яких

визначали інтегральні інтенсивності складових швидкості оброблення на задній поверхні представлено на рис. 2.5.

Точки 1-5 та 7-11 розташовані на різальній кромці профілю зубця, точки 6 та 12 на різальній кромці внутрішнього та зовнішнього діаметрів мітчика відповідно. Точка 13 знаходиться на різальній кромці забірного конуса, тому вважаємо, що зона «перекривання» для даної точки відсутня.

Аналітичні розрахунки зміни швидкості обертання оправки навколо власної осі та навколо осі кільцевої ванни показали, що IV_n та IV_t збільшуються рівномірно при збільшенні кутових швидкостей для всіх варіантів базування мітчиків в робочій зоні верстату. Такі результати зміни складових інтенсивності оброблення повністю коорелюються із результатами розрахунків для багатогранних непереточуваних твердосплавних пластин, проведених в [23]. Тому, для аналізу ефективності та характеру оброблення мітчиків, обрано кутові швидкості $\omega_O = 500$ об/хв, $\omega_B = 250$ об/хв, які рекомендовані для оброблення осьового різального інструменту [41].

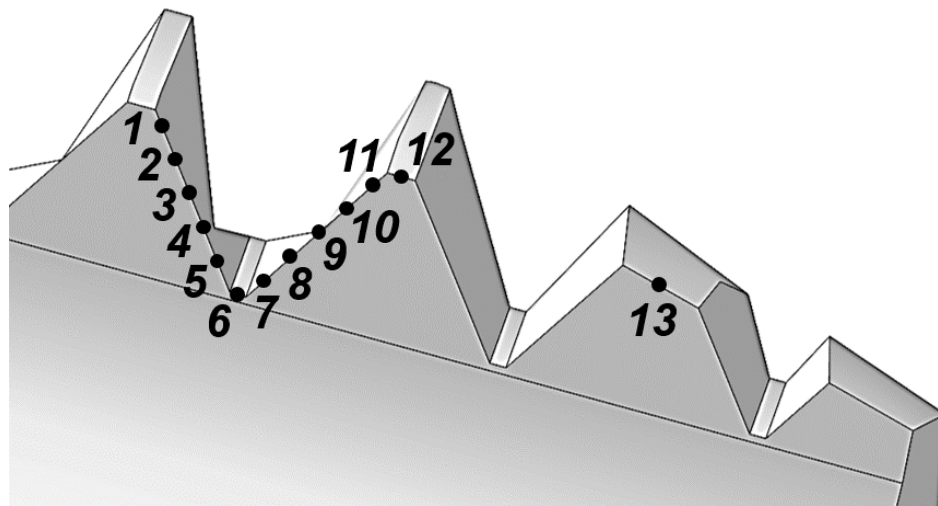


Рис. 2.5. Розташування точок на робочій поверхні мітчика, для яких проводили розрахунки

Результати розрахунків інтегральної інтенсивності складових швидкості оброблення за запропонованим вище методом по задній поверхні робочої

частини мітчиків в режимі обертання за годинниковою стрілкою при різних кутах базування інструменту до площини робочої зони представлено у вигляді гістограм на рис. 2.6-2.7.

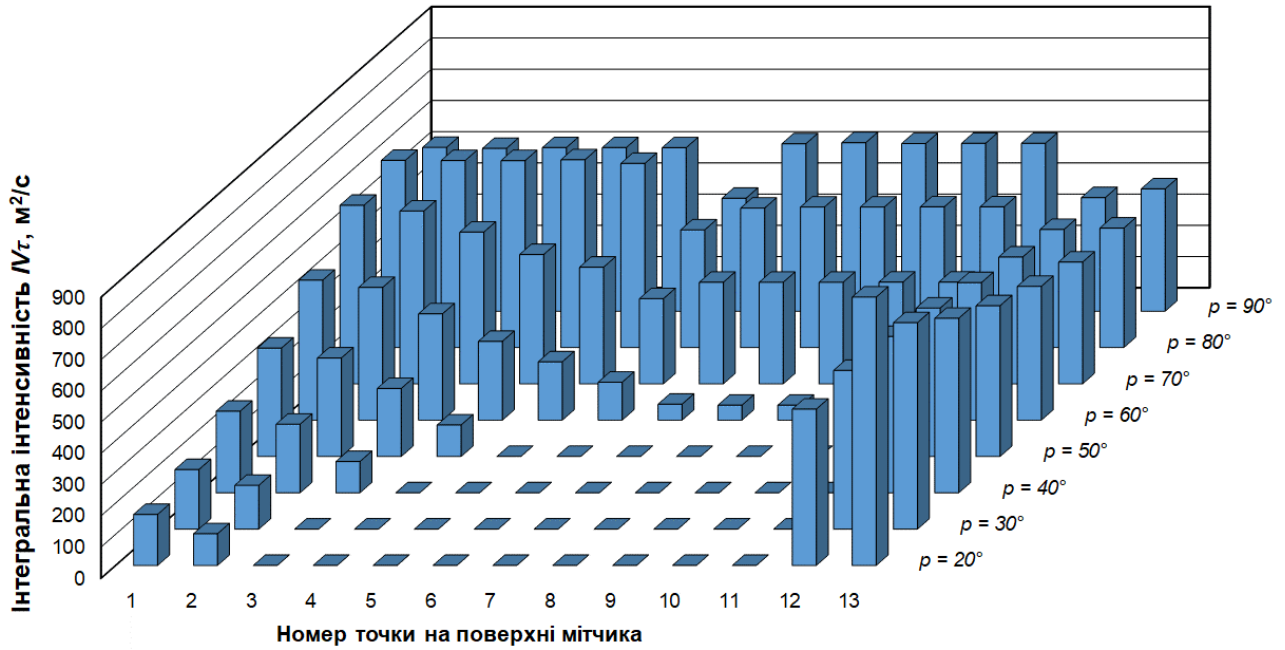


Рис. 2.6. Інтегральна інтенсивність оброблення IV_{τ} на задній поверхні при $p = 20-90^\circ$

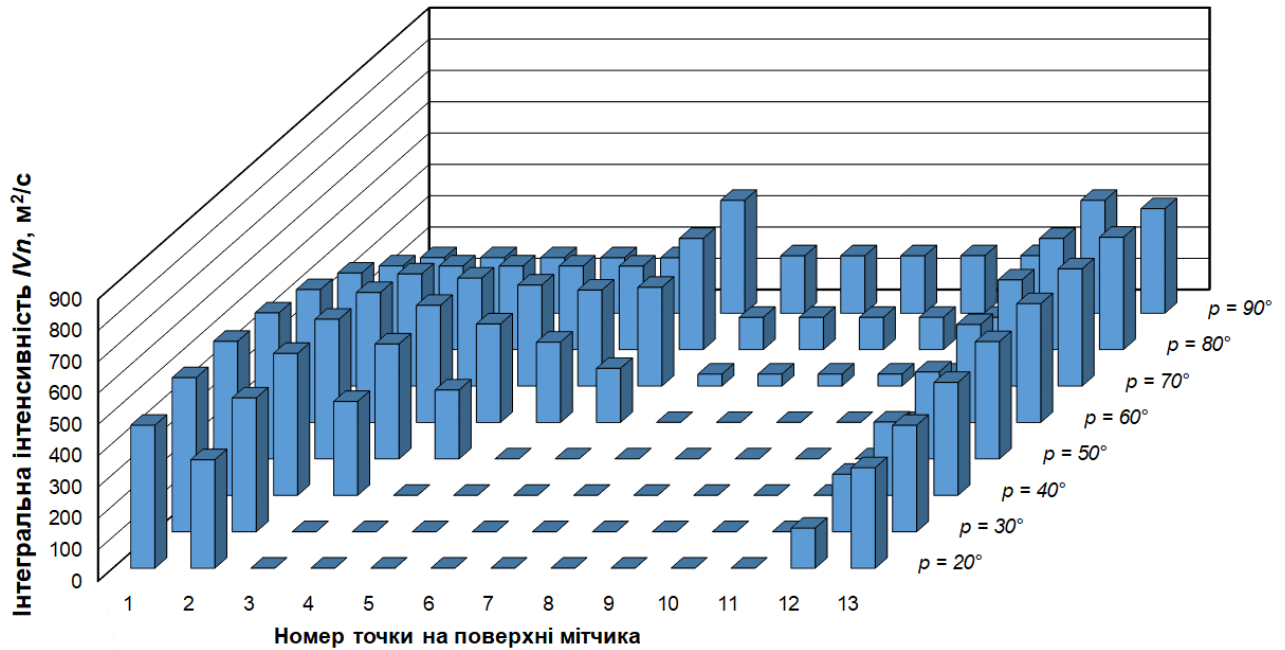


Рис. 2.7. Інтегральна інтенсивність оброблення IV_{η} на задній поверхні при $p = 20-90^\circ$

Показано, що при $p = 20-60^\circ$ обробляються лише точки, близькі до вершин, на вершинах зубців та на забірному конусі. Для точок 1-2 інтегральна інтенсивність за нормальною складовою до 2 разів більша ніж за тангенціальною і складає $IV_n = 450-500 \text{ м}^2/\text{с}$. Для точок 12-13 навпаки, $IV_n = 200-350 \text{ м}^2/\text{с}$, тоді як $IV_t = 500-650 \text{ м}^2/\text{с}$. Тобто, MAO мітчиків при $p = 20-60^\circ$ є недоцільним, тому що частина поверхонь знаходиться в зоні «перекривання» де відсутній активний процес взаємодії з МАІ.

Виконаний аналіз результатів розрахунків показав, що ефективне оброблення всіх поверхонь робочої частини мітчика відбувається при куті нахилу інструменту до площини робочої зони $p = 60-90^\circ$.

Для діапазону кутів $p = 60-90^\circ$ було проведено додаткові розрахунки інтегральної інтенсивності за повний цикл оброблення – як в режимі обертання мітчика за годинниковою стрілкою, так і в зворотному напрямку. Результати розрахунків представлено на рис. 2.8-2.9.

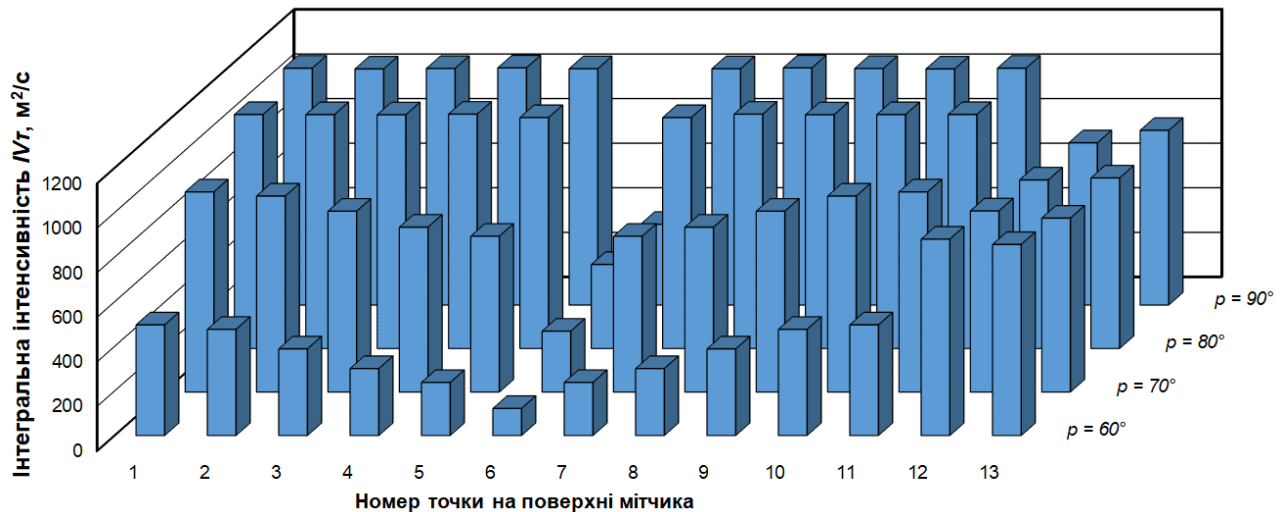


Рис. 2.8. Інтегральна інтенсивність оброблення IV_t на задній поверхні за повний цикл при $p = 60-90^\circ$

Значення як IV_n так і IV_t збільшуються та набирають стабільного значення із збільшенням кута p . При $p = 60^\circ$ для точок 1-6 значення $IV_n = 400-150 \text{ м}^2/\text{с}$, $IV_t = 500-100 \text{ м}^2/\text{с}$, що симетрично відносно точки 6 для точок 6-11.

На вершинах зубців та на забірному конусі $IV_n = 600, 750 \text{ м}^2/\text{с}$ та $IV_t = 850, 800 \text{ м}^2/\text{с}$ відповідно.

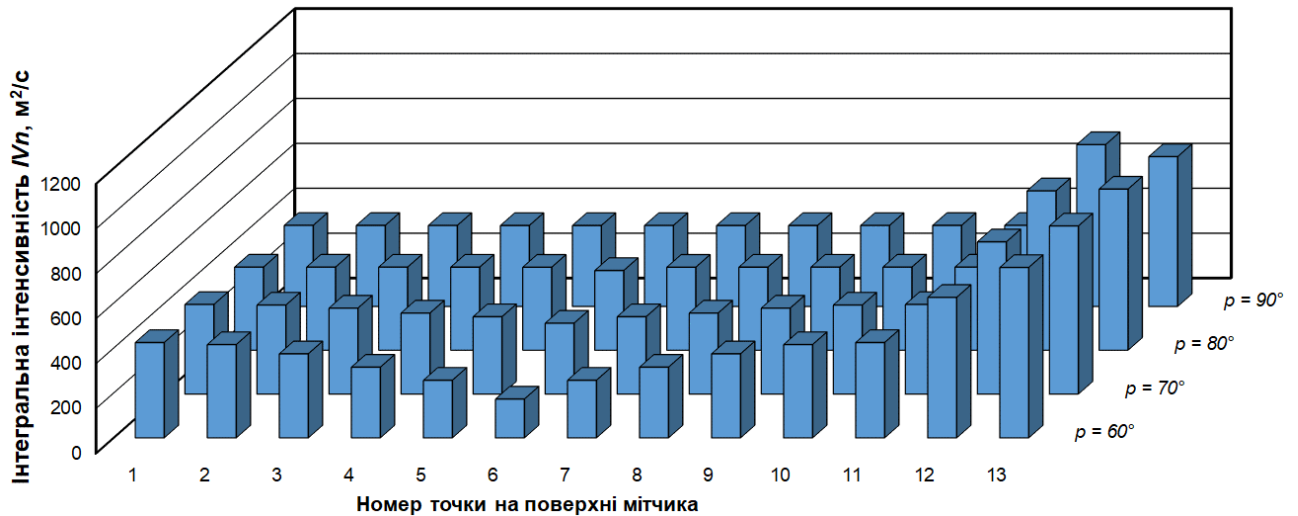


Рис. 2.9. Інтегральна інтенсивність оброблення IV_n на задній поверхні за повний цикл при $p = 60-90^\circ$

При $p = 70^\circ$ для точок 1-6 $IV_n = 400-350 \text{ м}^2/\text{с}$, $IV_t = 850-300 \text{ м}^2/\text{с}$, на вершинах зубців та на забірному конусі $IV_n = 700, 750 \text{ м}^2/\text{с}$ та $IV_t = 800 \text{ м}^2/\text{с}$ відповідно. При $p = 80^\circ$ та $p = 90^\circ$ значення стають однаковими для всього профілю з мінімальною різницею, так для точок 1-11 $IV_n = 400 \text{ м}^2/\text{с}$, $IV_t = 1050 \text{ м}^2/\text{с}$, на вершинах зубців та на забірному конусі $IV_n = 700 \text{ м}^2/\text{с}$ та $IV_t = 750-800 \text{ м}^2/\text{с}$.

На рис. 2.10 приведені значення відношень інтегральних інтенсивностей оброблення IV_t до IV_n у різних точках різальної кромки мітчика в залежності від кута p .

Встановлено, що при $p = 60^\circ$ спостерігається однакова полірувальна та зміцнювальна дія МАІ на бічні поверхні зубців, а зі збільшенням кута p переважною є полірувальна. На циліндричній поверхні зубців полірувальна дія МАІ зменшується та вирівнюється із зміцнювальною по мірі збільшення кута p . На забірній частині переважна полірувальна взаємодія МАІ з поверхнею спостерігається при $p = 60^\circ$ та $p = 90^\circ$.

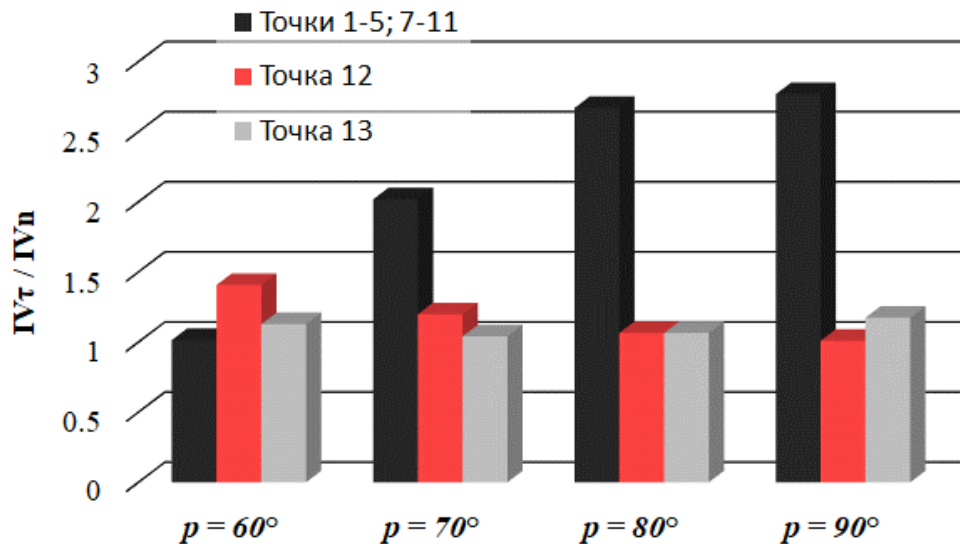


Рис. 2.10 Середнє значення IV_{τ} / IV_n

2.4. Висновки

Розроблено метод розрахунку кількісної оцінки дій квазістабільних об'ємів МАІ на робочі поверхні мітчиків під час магнітно-абразивного оброблення. Вперше визначено особливості процесу МАО мітчиків в умовах робочих зазорів кільцевого типу в залежності від особливостей їх базування в зоні оброблення.

Встановлено, що за результатами розрахунків можна виконувати прогнозування вірогідного впливу базування мітчиків в робочій зоні на якість оброблення їх робочих поверхонь. Визначено, що IV_n та IV_{τ} збільшуються рівномірно при збільшенні кутових швидкостей для всіх варіантів базування мітчиків в робочій зоні верстату.

Показано, що при $p = 20-60^\circ$ обробляються лише точки, близькі до вершин, на вершинах зубців та на забірному конусі, $IV_n = 200-350 \text{ м}^2/\text{с}$, $IV_{\tau} = 500-650 \text{ м}^2/\text{с}$. Тобто, МАО мітчиків при $p = 20-60^\circ$ є недоцільним, тому що частина поверхонь знаходиться в зоні «перекривання» де відсутній активний процес взаємодії з МАІ.

Ефективне МАО мітчиків доцільно виконувати за умов їх розташування під кутом $p = 60-90^\circ$ до площини робочої зони. При $p = 60^\circ$ на бічних гранях $IV_n = 150-400 \text{ м}^2/\text{с}$, $IV_t = 100-500 \text{ м}^2/\text{с}$. На вершинах зубців та на забірному конусі $IV_n = 600, 750 \text{ м}^2/\text{с}$ та $IV_t = 850, 800 \text{ м}^2/\text{с}$ відповідно. При $p = 70^\circ$ на бічних гранях $IV_n = 350-400 \text{ м}^2/\text{с}$, $IV_t = 300-850 \text{ м}^2/\text{с}$, на вершинах зубців та на забірному конусі $IV_n = 700, 750 \text{ м}^2/\text{с}$ та $IV_t = 800 \text{ м}^2/\text{с}$ відповідно. При $p = 80^\circ$ та $p = 90^\circ$ значення стають однаковими для всього профілю з мінімальною різницею, так для бічних граней $IV_n = 400 \text{ м}^2/\text{с}$, $IV_t = 1050 \text{ м}^2/\text{с}$, на вершинах зубців та на забірному конусі $IV_n = 700 \text{ м}^2/\text{с}$ та $IV_t = 750-800 \text{ м}^2/\text{с}$.

Для отримання переважного полірувального ефекту, кут нахилу мітчиків повинен складати $p = 80-90^\circ$, а зміцнювального – $p = 60-70^\circ$.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Матеріали досліджень

Дослідження проводили на мітчиках із швидкорізальної сталі Р6М5 різних розмірів, типів та виробників для нарізання метричної різьби, які представляють основну частину даного інструменту на виробництві (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Типові представники мітчиків для проведення досліджень:

- а) $M12 \times 1,75-6H$ з прямими стружковими канавками; б) $M10 \times 1-6H$ з прямими стружковими канавками; в) $M10 \times 1,5-6H$ з прямими стружковими канавками; г) $M10 \times 1,5-6H$ з підточуванням передньої поверхні; д) $M10 \times 1,5-6H$ з гвинтовими стружковими канавками; е) $M6 \times 0,75-6H$ з прямими стружковими канавками

3.2. Обладнання для МАО та режими оброблення

Схема МАО з великою робочою зоною кільцевого типу застосовується для оброблення різнотипного РІ, лопаток газотурбінних двигунів та інших циліндричних та складнопрофільних деталей. Зазначена схема реалізована на дослідно-промисловому вертикально фрезерному верстаті типу ОЦ – Іжевськ (рис. 3.2).

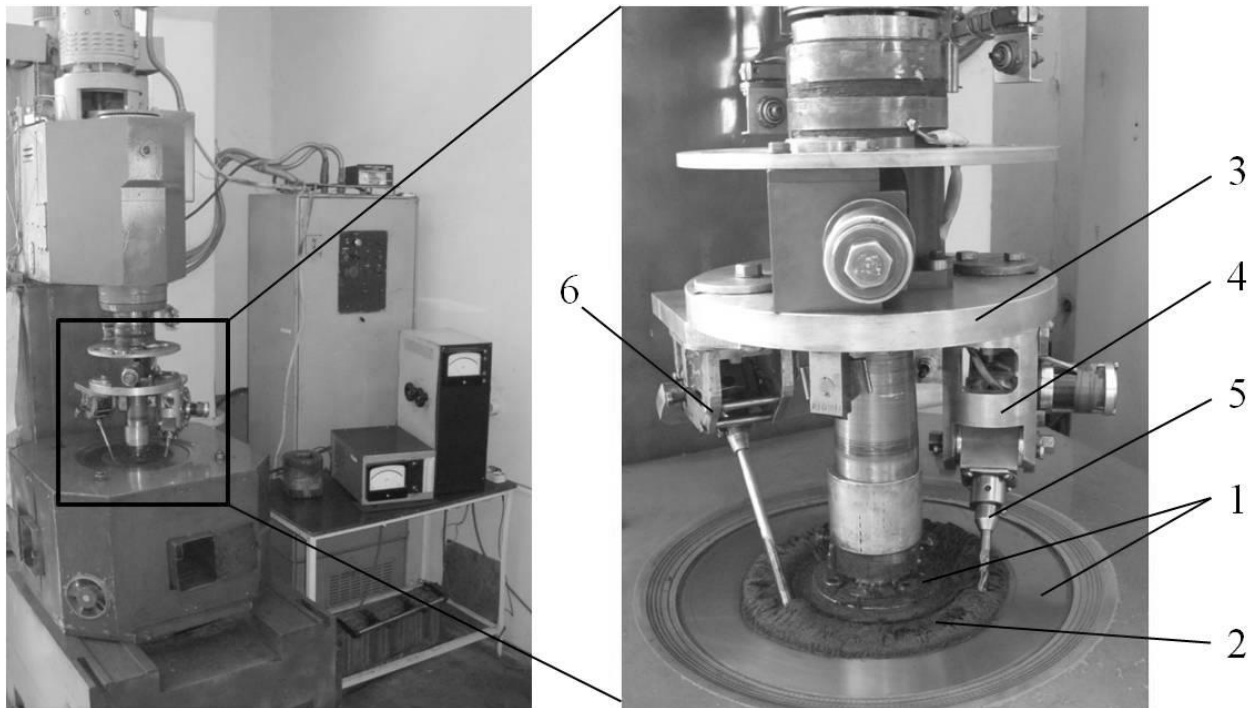


Рис. 3.2. Експериментальна магнітно-абразивна установка типу
"кільцева ванна"

Схема МАО складається з магнітної системи, встановленої на нерухомому горизонтальному робочому столі та універсальної головки, що кріпиться до шпинделя верстата, який має можливість рухатися у вертикальному напрямку. Вісь шпинделя співпадає з вертикальною віссю магнітної системи. Магнітна система складається з розгалуженого, симетричного магнітопроводу з коаксіально розташованими полюсними наконечниками (1), які утворюють між полюсами кільцеву робочу зону (2), яка заповнюється МАП, який під дією магнітного поля формується в процесі оброблення в МАІ. Середній діаметр кільцевої робочої зони дорівнює 200 мм, її висота – 30 мм, ширина – 35 мм. Така конструкція дає можливість обробляти деталі з різною просторовою формою та в широких межах їх розмірів. Магнітна індукція у вільному від МАП міжполюсному просторі може регульовано змінюватись в межах 0,02 – 0,5 Тл, що достатньо для представленої схеми МАО. Частота обертання головного шпинделя змінюється в межах 0-500 об/хв, міні-шпинделя – в межах

0-1200 об/хв.

Універсальна головка являє собою базову плиту (3) на якій з одного боку закріплюється з можливістю повороту навколо вертикальної осі пристрій повороту оправки (4) відносно площини кільцевої ванни (рис. 3.3). В пристрої встановлено мінішпindel, у якому закріплюється оправка з оброблюваним мітчиком. Оправка (5) має можливість вільно обертатися навколо власної осі і осі мінішпинделя. З протилежного від місця кріплення інструменту боку на осі мінішпинделя (4) встановлено редуктор, який з'єднано з двигуном постійного струму.

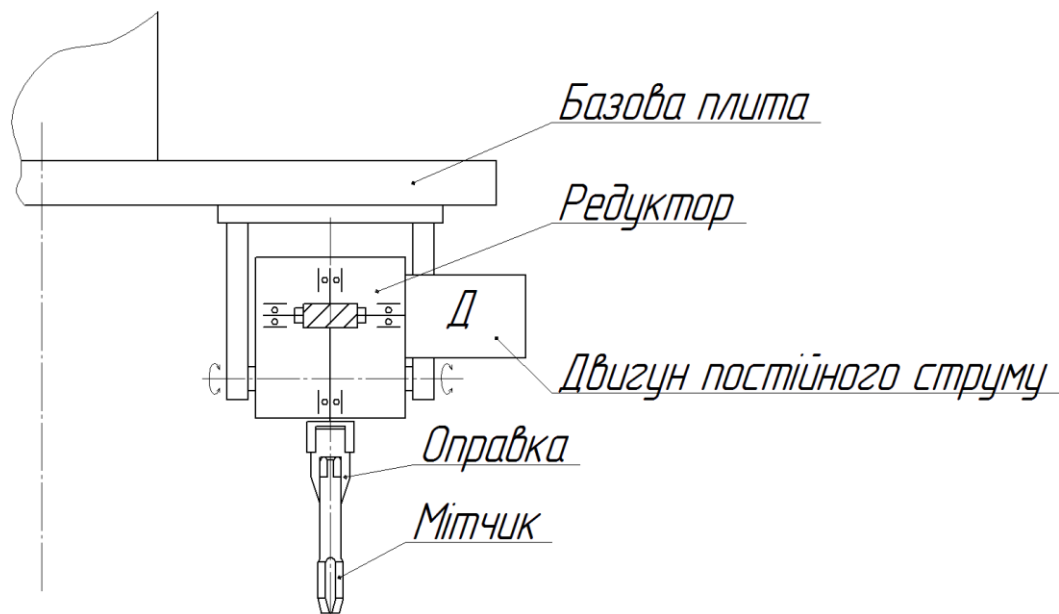


Рис. 3.3. Схема пристрою повороту оправки

Додатково на плиті, радіально до встановленого мінішпинделя, розташовується другий змінний мінішпindel спрощеної конструкції (6), що не передбачає обертання деталі навколо власної осі, має можливість керованого повороту навколо вертикальної осі і використовується для встановлення в ньому додаткового формоутворюючого МАІ елементу [41]. Основний і додатковий мінішпинделі мають можливість розташовуватися під різними кутами по відношенню до дотичної лінії кільцевої ванни. При MAO оброблювана деталь, закріплена на оправці, може обертатися навколо осі кільцевої ванни разом з

універсальною головкою та навколо власної осі.

Таким чином налаштування оправки з мітчиком можна виконувати нахилом осі мітчиків до площини робочої зони (p) та поворотом осі мітчиків відносно дотичної до кола обертання навколо осі кільцевої ванни (q), що забезпечує різні варіанти розташування інструменту в робочій зоні (рис. 3.4).

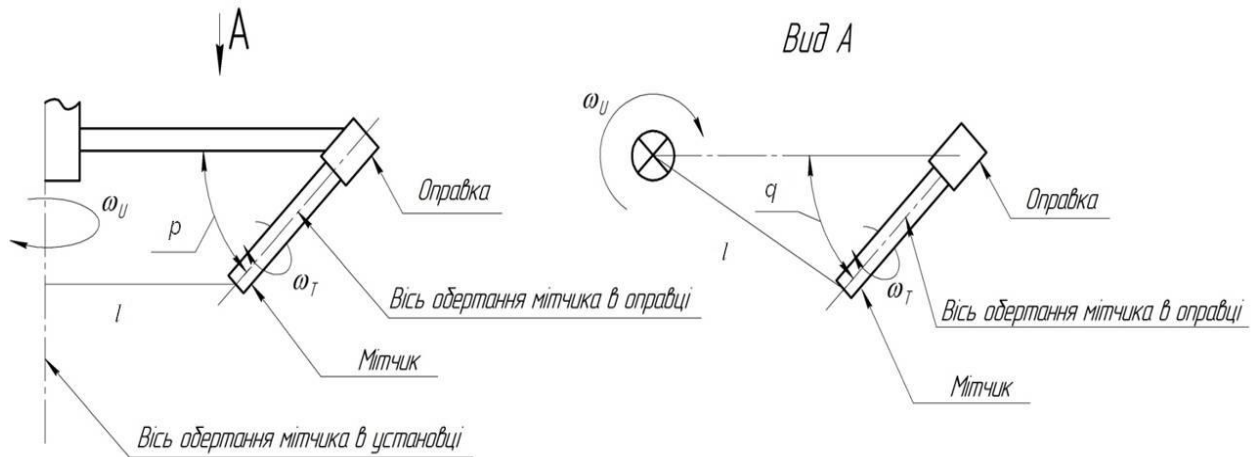


Рис. 3.4. Схема кутів розташування мітчиків в робочій зоні верстату

Оброблення можливо виконувати при різних режимах – в умовах «натікання» (рис. 3.5 а) та «стікання» (рис. 3.5 б) феромагнітного середовища з поверхонь деталей [40, 41].

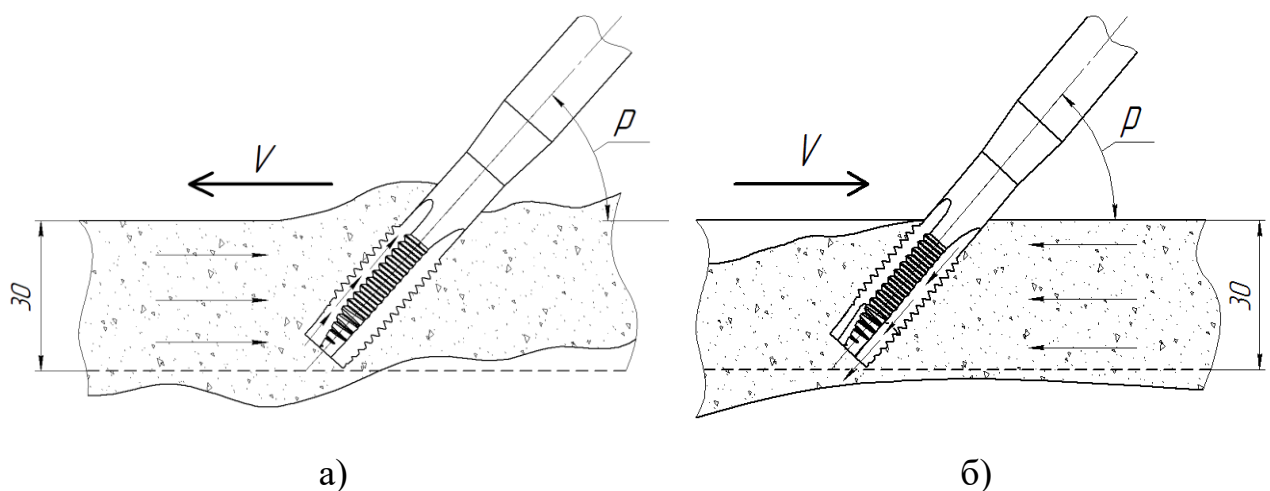


Рис. 3.5. Режими оброблення мітчиків: а) режим «натікання»; б) режим «стікання»

Додатково для МАО мітчиків використовували модернізований верстат ЛФ-260 із спеціальною головою, яка забезпечує можливість обертання виробів з реверсом навколо осі кільцевої ванни з регульованою швидкістю, реверсне обертання інструменту навколо власної осі, але без різного кутового базування оброблювальних деталей в робочій зоні (рис. 3.6) [71, 72]. Даний верстат використовували для оброблення мітчиків з кутом $p=90^\circ$.

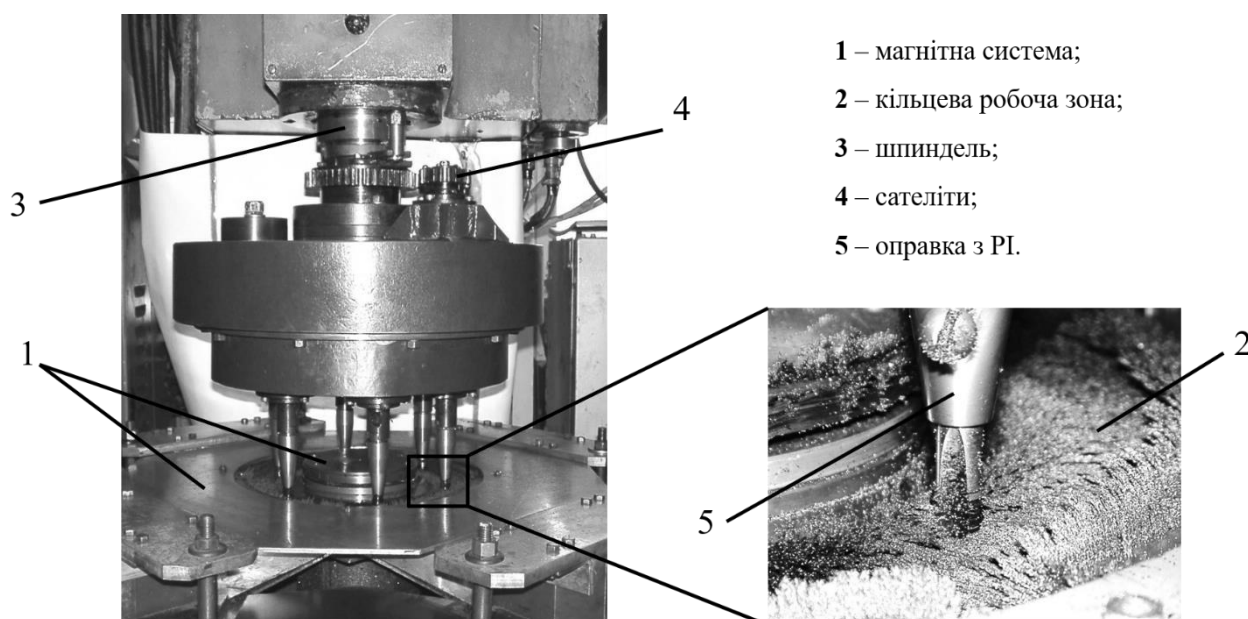


Рис. 3.6. Експериментальна магнітно-абразивна установка для оброблення деталей під кутом $p=90^\circ$

3.3. Магнітно-абразивні матеріали, що використовували при МАО

Загальним для більшості абразивних інструментів (шліфувальних кругів і брусків, стрічок і ін.) є те, що абразивні зерна в них, як правило, мають неправильну геометричну форму, яка в основному залежить від природи абразиву, технології його виготовлення і дроблення. На ефективність оброблення в більшій мірі позначаються індивідуальні властивості абразивних зерен і характер сумісної дії зерен на оброблювану поверхню. При МАО під впливом магнітного поля порошок, ущільнюючись, виконує роль абразивного інструменту. Ущільнення, як відомо, за інших рівних умов залежить від форми частинок порошку. Чим більше він ущільнений, тим менше міжчасткова пористість і тим більші

контактні плями з оброблюваною поверхнею. Сформульовано одну з головних вимог до оптимальної форми частинок магнітно-абразивного порошку: вона повинна забезпечувати розміщення на поверхні частинок МАП якомога більше різальних елементів і максимальну ступінь його ущільнення [70]. Крім того, бажано, щоб частинки взаємодіяли з оброблюваним матеріалом рівномірно, що забезпечить тривале збереження технологічної стійкості частинок. Тому необхідно, щоб форма частинок сприяла її частому повертанню під дією механічних сил в робочому просторі.

Вибір форми частинок МАП значною мірою визначається твердістю їх структурних складових та оброблюваного матеріалу. Для полірування загартованих сталей і інших твердих матеріалів рекомендується використовувати МАП, частинки якого складаються з феромагнітної матриці з твердими абразивними включеннями. При поліруванні кольорових металів і сплавів доцільно використовувати МАП з високою інтегральною твердістю частинок. При цьому округла форма частинок забезпечує вищі класи шорсткості, а частинки осколкової форми - більше знімання матеріалу.

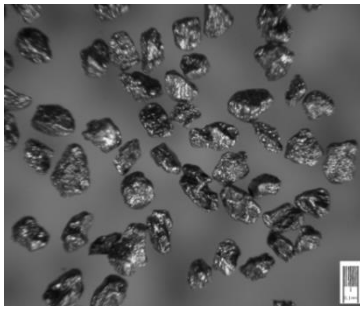
Останнім часом для МАО використовують порошкові матеріали, які умовно поділяють на декілька груп, а саме: механічні суміші магнітних і абразивних частинок, порошкові матеріали, отримані методами порошкової металургії - так звані керметні та плаковані порошки і порошки отримані шляхом диспергування розплавів з подальшою їх класифікацією і розмелом [56, 63, 70]. Дослідження виконанні із застосуванням зазначених вище груп порошків показали, що схеми МАО та умови в яких виконується оброблення є визначальними при виборі групи і типу порошку.

Для оброблення виробів простої геометричної форми з феромагнітних матеріалів використовують робочу зону малих розмірів з підвищеними значеннями магнітної індукції в робочих зазорах – від 0,5 до 1 Тл. Для зазначених схем визначальним фактором ефективності МАО є величина магнітної індукції,

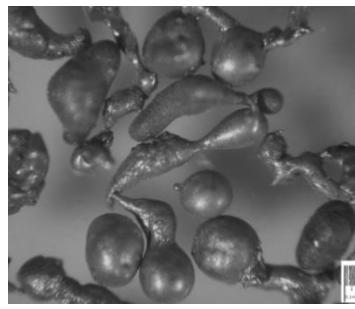
яка визначає ступінь притискання частинок МАІ до оброблюваних поверхонь. Оброблення виробів складної просторової форми доцільно проводити на верстатах з великою робочою зоною, в умовах коли визначальними факторами ефективного МАО є швидкість і траєкторія руху оброблюваних деталей – динамічний фактор, який забезпечує притискання частинок магнітно-абразивного матеріалу (МАО) до оброблюваних поверхонь. Різниця в схемах оброблення визначає вимоги до властивостей порошкових МАО. Якщо для схем з малими робочими зонами міцність зерен МАІ не є критичною, то для умов їх «динамічного» навантаження – при використанні на установках з великими робочими зонами при незначних магнітних індукціях в зоні оброблення (до 0,5 Тл)- є однією з визначальних. Вибір магнітно-абразивного порошку для конкретної схеми оброблення й оброблюваного матеріалу є досить складною проблемою, пов'язаною з відсутністю повної інформації про ефективність роботи існуючих порошків у різних умовах і великій кількості властивостей, які визначають їх експлуатаційні характеристики.

Для МАО мітчиків використовували порошкові матеріали отримані методами порошкової металургії (рис. 3.7).

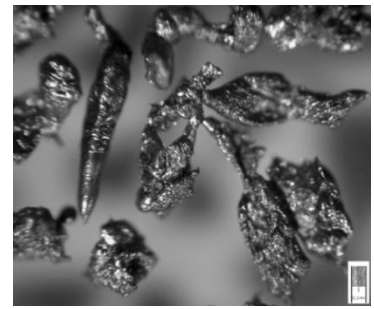
Серед переваг таких порошків є можливість застосовування порівняно широкої гами абразивних матеріалів, простота технологічного процесу їх отримання, можливість варіювання абразивною складовою та її розміром [70]. Для МАО мітчиків використовували порошки отримані методом диспергування розплавів Поліам-Т з розміром зерен 200/160 мкм; Поліам-М з розміром частинок 400/315 мкм, Царамам 630/400 мкм, Поліам-Т 400/315 мкм та розпилений порошок швидкорізальної сталі ПР Р6М5 з зернистістю 200/160 мкм. В якості МОТС використовували АСФОЛ, який складається з синтетичних та рослинних масел [39].



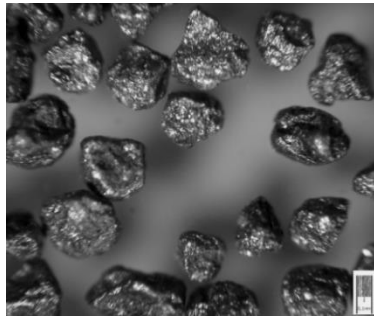
Полімам-Т 200/160 мкм



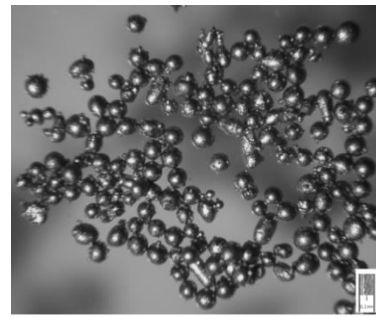
Полімам-М 400/315 мкм



Царамам 630/400 мкм



Полімам-Т 400/315 мкм



ПР Р6М5 200/160 мкм

Рис. 3.7. Зовнішній вигляд частинок порошків, що використовувалися при
МАО мітчиків

3.4. Вимірювання шорсткості робочих поверхонь мітчиків

Вимірювання шорсткості поверхні проводили на спеціальному модулі (рис. 3.8), зібраному на основі профілометра мод. 296 та профілографі-профілометрі 252. Принцип роботи модуля заснований на принципі оцупування досліджуваної поверхні алмазною голкою щупа з малим радіусом округлення і перетворення виникаючих при цьому механічних коливань щупа в зміну електричного сигналу, пропорційного цим коливанням.

Перетворення лінійних коливань голки, які відповідають профілю поверхні в електричні сигнали, відбувається в датчику (1). Переміщення датчика (1) по поверхні (4), що вимірюється, здійснюється мотоприводом (2), який встановлюється на стійці (3). Блок спряження (5) складається з фільтру низьких частот (6) типу RC і підсилювача (7). Фільтр призначено для виділення сигналу

в діапазоні 0... 250 Гц. Сигнал з блока спряження поступає на аналого-цифровий перетворювач (АЦП), встановлений в блоці (8) електронно-обчислювальної машини (ЕОМ).

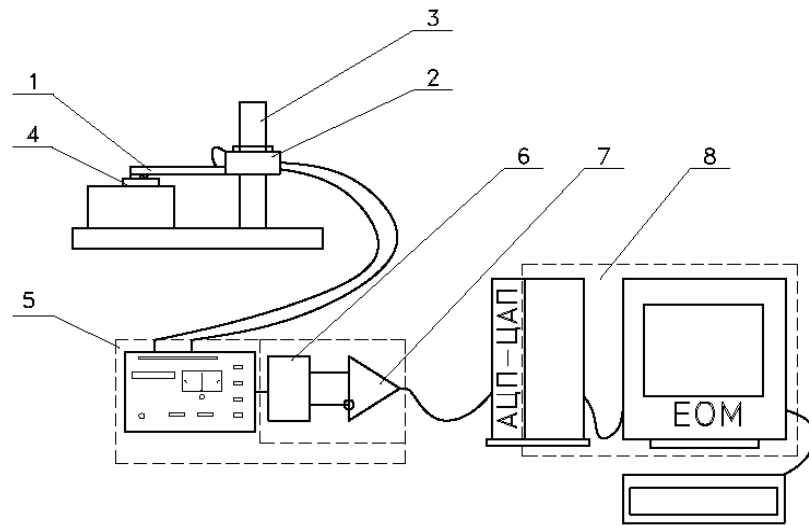


Рис.3.8. Блок-схема модуля для вимірювання шорсткості.

Модуль дозволяє вимірювати з точністю 0,001 мм, при використанні алмазної голки з радіусом округлення 0,01 мм та застосуванні додаткового математичного апарату. Принцип вимірювання шорсткості на задній поверхні мітчика представлено на рис. 3.9.



Рис. 3.9. Принцип вимірювання шорсткості на задній поверхні мітчика

Вимірювання шорсткості мітчика проводилося в декілька етапів. Спочатку проводиться тарування величини вертикальних та горизонтальних переміщень алмазної голки, тобто визначаються масштабні коефіцієнти по осях. Тарування вертикальних переміщень проводиться на всьому вимірюваному діапазоні по набору плоско-паралельних кінцевих мір довжини. Тарування горизонтальних переміщень проводиться на всій вимірюваній довжині переміщення датчика за допомогою повіреної лінійки, а для більш точного тарування використовується еталонна міра шорсткості з регулярним мікропрофілем.

Далі проводяться вимірювання профілю, результати якого, за допомогою масштабних коефіцієнтів, приводяться до метричної системи координат деталі.

Обробка результатів вимірювання може проводитися в різноманітних системах, наприклад, *MathCad* та *MatLab*.

Контролювали величину параметру шорсткості Ra . На рис. 3.10 показано схему вимірювання шорсткості робочих поверхонь мітчиків.

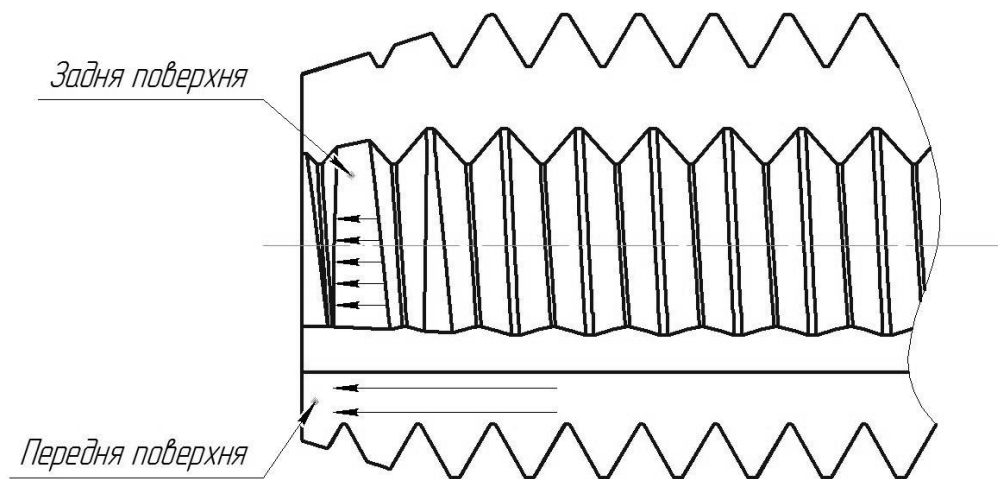


Рис. 3.10. Схема вимірювання шорсткості на робочих поверхнях мітчиків

Профілограф-профілометр моделі 252 забезпечує вимір таких параметрів шорсткості поверхні: Ra - середнє арифметичне відхилення профілю; Rz - висота нерівностей профілю по 10 точках; H_{max} - висота найбільшого виступу профілю; H_{min} - глибина найбільшої западини профілю; tr - відносна опорна довжина

профілю; n - число кроків нерівностей в межах довжини траси ощупування.

Крім того, прилад дозволяє вимірювати і хвилястість поверхні на довжині траси 50 мм. Фіксація результатів вимірювань може здійснюватися як на паперову стрічку у вигляді профілограми (малюнок відображає профіль поверхні з урахуванням обраного масштабу), так і на цифровому пристрої відображення даних.

3.5. Вимірювання поверхневої твердості та дюрOMETричний аналіз матеріалу

Визначення поверхневої твердості робочої частини мітчиків виконували на мікротвердомірі ПМТ-3 (рис. 3.11). Даний метод визначення твердості широко застосовується при дослідженні стану поверхневих шарів, фазових складів та структур матеріалів. У якості індентора при вимірі мікротвердості по Віккерсу використовують правильну чотиригранну алмазну піраміду з кутом при вершині 136° . Ця піраміда плавно вдавлюється в зразок при навантаженнях. Глибина вдавнення індентора при визначенні мікротвердості становить кілька мікрометрів.



Рис. 3.11. Мікротвердомір ПМТ-3

Для нанесення відбитка випробуваний зразок установлюють під мікроскопом і вибирають на ньому місце, у якому необхідно виміряти мікротвердість. Потім переміщають зразок так, щоб обране місце виявилось під вістрям алмазної піраміди (поворотом предметного столика на 180°). Після вдавнення індентора та зняття навантаження зі зразка останній знову переводять під мікроскоп і вимірюють довжину діагоналі відбитка.

Для забезпечення точного виміру мікротвердості прилад має бути ретельно юстований. Завдання юстировки — точне сполучення оптичної осі з віссю навантаження при повороті предметного столика на 180° . Іншими словами, необхідно добитися, щоб відбиток наносився саме на тому місці, яке було обрано під мікроскопом.

При визначенні поверхневої твердості навантаження на індентор складало 1, 1,5 та 2 Н, вимірювання в кожній позиції виконували не менше трьох разів при кожному навантаженні. Вимірювання поверхневої твердості проводили на задній поверхні зубців мітчиків. Позиції вимірювання показані на рис. 3.12.

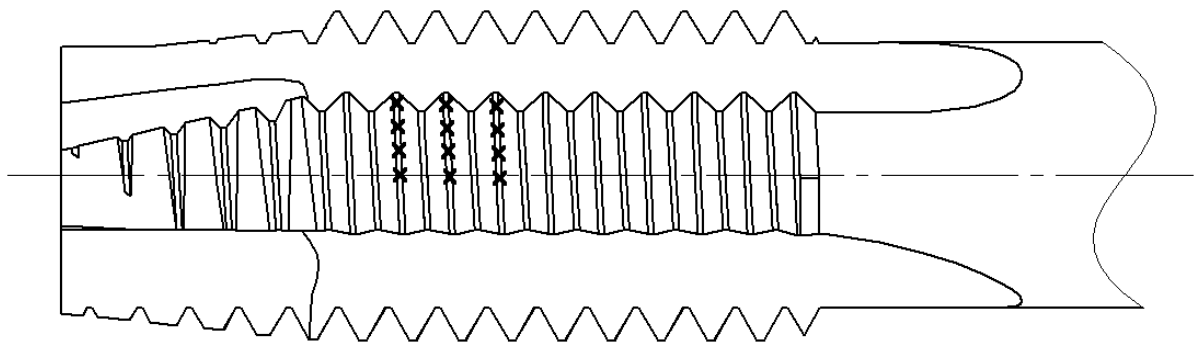


Рис. 3.12. Схема вимірювання поверхневої твердості мітчиків

Дослідження мікроструктури виконували на растрово-електронному мікроскопі РЕМ-106И.

Величину поверхневої твердості визначали за формулою (3.1):

$$P = \frac{1,854 \times N}{(d \times c)^2} \times 1000 \quad (3.1)$$

де P – поверхнева твердість, ГПа;

d – середня довжина діагоналі відбитка, поділки шкал;

c – коефіцієнт тарування;

N – навантаження на індентор, Н.

3.6. Вимірювання радіусів округлення різальних кромок

Геометричні характеристики РК визначаються величинами радіусів округлення та К-фактору [23]. Дані параметри можливо вимірювати тактильним та оптичним методами. В усіх випадках радіус округлення та інші параметри РК визначаються в перпендикулярному до неї перерізі. При тактильних методах вимірювання в якості датчика використовують щуп у вигляді голки, а вимірювання виконують на координатно-вимірювальних машинах. Такий метод забезпечує вимірювання обмеженої ділянки профілю в одному перетині та займає багато часу. При оптичному методі вимірювання створюється 3-D модель ділянки РК, а сам процес вимірювання займає на багато менше часу в порівнянні з тактильним [84].

Вимірювання мікрогеометричних характеристик РК мітчиків виконували на оптичному приладі *MikroCAD* (ZOM Oberflächenbearbeitung GmbH, Магдебург, Німеччина) (рис. 3.13), який дозволяє визначати форму та радіус округлення РК в необхідних перерізах.

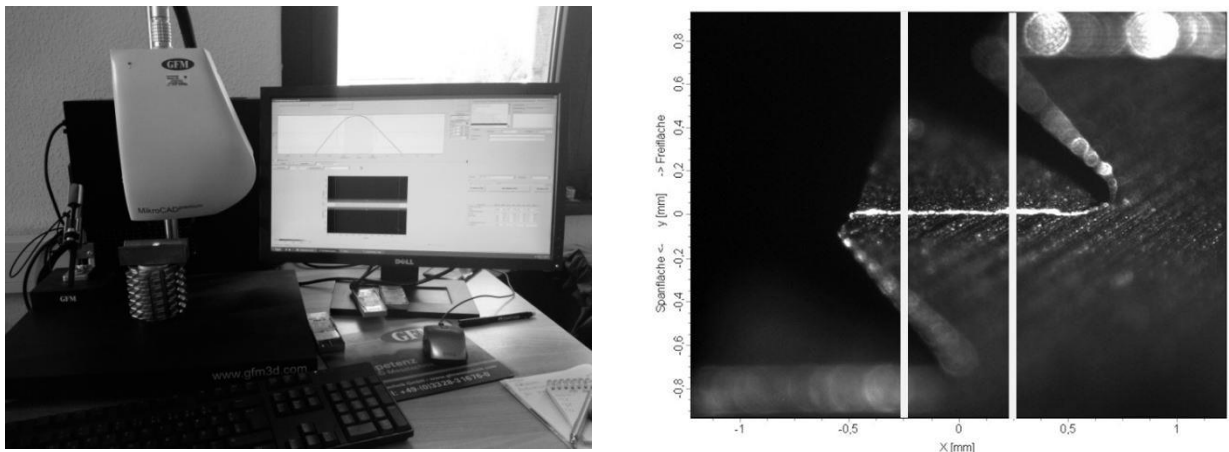


Рис. 3.13. Вимірювання радіусів округлення РК мітчиків

MikroCAD по координатах відтворює 3D модель різальної кромки мітчика (рис. 3.14 а), а потім в програмному забезпеченні визначається величина радіусу округлення різальної кромки в потрібному перерізі (рис. 3.14 б).

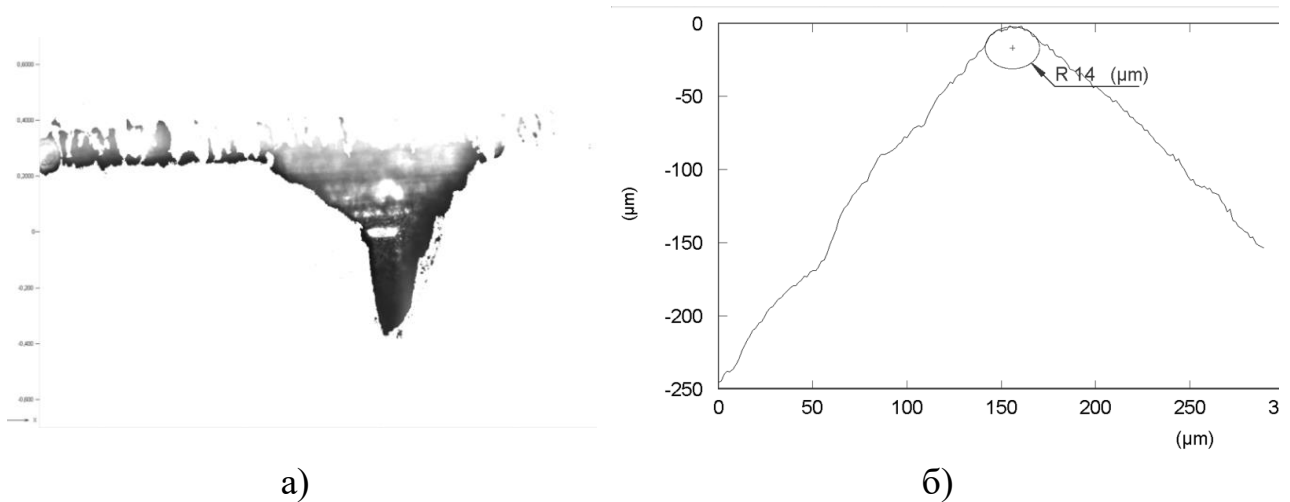


Рис. 3.14. Створення просторової форми РК (а) та визначення її радіусу (б)

3.7. Вимірювання точності мітчиків

При виготовленні різьбонарізного інструменту велику увагу потрібно приділяти геометричній точності робочої частини, яка впливає на точність профілю нарізаної різьби. Важливо, щоб після фінішних етапів оброблення інструменту, геометрія робочої частини не змінювалась, а якісні характеристики підвищувалися. В іншому випадку на виробництві можливим є велика ймовірність браку деталей при їх виготовленні, що призведе до суттєвих фінансових втрат.

Для визначення впливу МАО на точність мітчиків, контролювали зміну зовнішнього діаметру різьби. Вимірювання точності проводили на установці для розмірного налаштування та вимірювання різальних інструментів Venturion 450/6 (ZOM Oberflächenbearbeitung GmbH, Магдебург, Німеччина). Установа обладнана високоточним шпинделем, що дозволяє проводити вимірювання діаметра з точністю 0,002 мм. Зовнішній вигляд установки представлено на рис. 3.15.

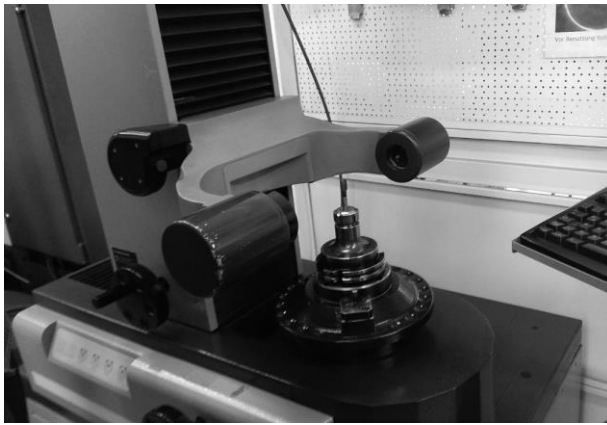


Рис. 3.15. Установка для розмірного налаштування та вимірювання різальних інструментів Venturion 450/6

3.8. Методика досліджень силових характеристик нарізання різьби

Дослідження силових характеристик при експлуатації мітчиків проводили на вертикально – свердлильному верстаті із застосуванням універсального динамометра УДМ–600 (рис. 3.16 а), котрий приєднано через узгоджувальний пристрій до ЕОМ (рис. 3.16 б).



а)



б)

Рис. 3.16. Обладнання для вимірювання силових характеристик нарізання різьби: а) універсальний динамометр УДМ-600; б) ЕОМ

Під час нарізання різьби всі параметри фіксувалися електронним блоком

та зберігались в пам'яті ЕОМ, після перетворення машинних сигналів в реальні значення вони стають придатними для опрацювання пакетом *MathCad*.

Для проведення досліджень була виконано тарування розробленого устаткування, за допомогою якого визначили момент, що виникає при обробленні заготовок мітчиками М12 дослідної партії під час проведення експериментів. Тарування виконано для розрахункового значення моменту, що дорівнює 40 Н·м.

3.9. Методика досліджень мітчиків на стійкість

Було досліджено кінетику процесу зношення по задній поверхні різальної частини мітчиків М10 від кількості нарізаних отворів. При дослідженнях експлуатаційної стійкості мітчиків, за критерій стійкості було прийнято знос по задній поверхні на рівні 0,3 мм. Саме така величина зносу достатня для забезпечення точності нарізаної різьби. Точність нарізаної різьби контролювали різьбовою калібром-пробкою.

Нарізання наскрізної різьби виконували в спеціально підготовленій плиті товщиною 10 мм, виготовленій із сталі 20 з твердістю $HV=1,85$ ГПа на вертикально-свердлильному верстаті 2К-13502. Отвори в плиті виконували у шаховому порядку з кроком між отворами в 12 мм. Швидкість різання $V=2,83$ м/хв, подача $S=1,5$ мм/об.

Зовнішній вигляд вертикально-свердлильного верстату та плити, в якій нарізали наскрізну різьбу представлено на рис. 3.17.

Вимірювання зносу зубців мітчика проводили на інструментальному мікроскопі ММИ-2 (рис. 3.18 а). Вимірювали максимальну величину зносу по задній поверхні від РК. Схема вимірювання зносу зубців представлено на рис. 3.18 б.

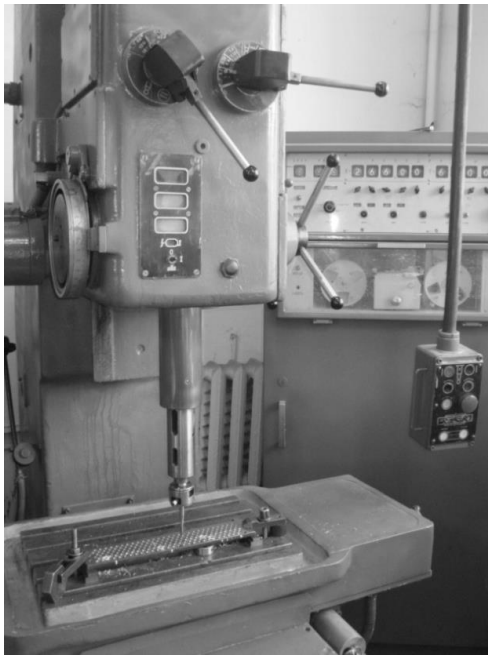
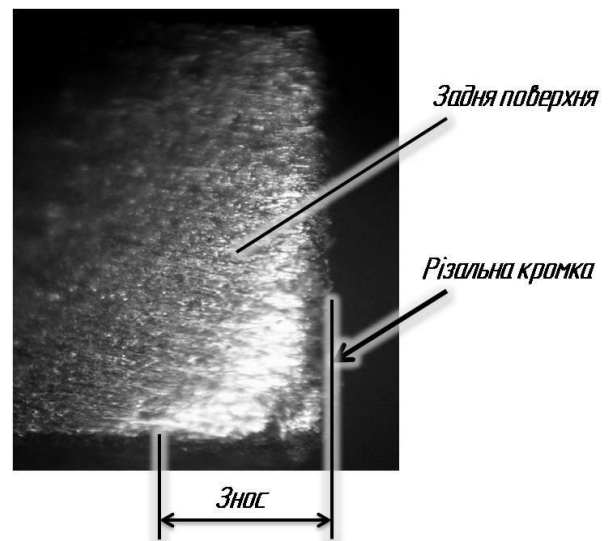


Рис. 3.17. Верстат 2К-13502У, на якому нарізали різьбу



а)



б)

Рис. 3.18. Обладнання (а) та схема вимірювання зносу зубців мітчиків (б)

Представлені методи вимірювань мікрогеометрії робочих поверхонь, РК та фізико-механічних властивостей поверхневих шарів в повній мірі відповідають вимогам точності та якості отримання результатів. Для МАО мітчиків використовували МАП, які забезпечують ефективне та якісне оброблення.

Використання запропонованих схем МАО забезпечує необхідні параметри розташування мітчиків в робочій зоні з широкими межами регулювання кутів. Методики вимірювання силових та стійкісних характеристик інструменту максимально наближені до реальних умов його експлуатації.

РОЗДІЛ 4

ВПЛИВ МАО НА МІКРОГЕОМЕТРІЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ МІТЧИКІВ

4.1. Режими магнітно-абразивного оброблення мітчиків

Експериментальні дослідження виконували на двох партіях мітчиків М12, шести партіях мітчиків М10 різних виробників та партії М6. В сумі, кількість досліджуваних одиниць склала 51 мітчик. Як змочувально-охолоджуюче технологічне середовище використовували олійну рідину марки АСФОЛ. Для відновлення форми магнітно-абразивного інструменту в процесі оброблення використовували відновлювальний стрижневий елемент (ВСЕ) з немагнітного матеріалу діаметром 8 мм, умови базування якого відповідали рекомендаціям, наведеним у [41]. Для експериментального підтвердження результатів аналітичних розрахунків, вибрано різні кути базування мітчиків в робочій зоні верстату.

Оброблення першої партії мітчиків М12×1,75-6Н виконували порошком Полімам-Т з розміром частинок 200/160 мкм. Швидкість руху деталі вздовж кільцевої ванни $V_B = 3 \text{ м/с}$, частота обертання навколо власної осі – $\omega_O = 300 \text{ об/хв}$. Величина магнітної індукції в робочій зоні складала $B = 0,25 \text{ Тл}$. Оброблення виконували при кутах базування мітчиків у робочій зоні: $p = 45^\circ$, $q = 25^\circ$ та $p = 65^\circ$, $q = 25^\circ$. Час оброблення у сумі склав 120 с для кожного мітчика.

МАО мітчиків М10×1,5-6Н з підточуванням передньої поверхні виконували із застосуванням магнітно-абразивних порошків: Полімам-М з розміром частинок 400/315 мкм, Царамам 630/400 мкм, Полімам-Т 400/315 мкм та ПР Р6М5 200/160 мкм. Швидкість руху деталі вздовж кільцевої ванни $V_B = 2,5 \text{ м/с}$, частота обертання навколо власної осі – $\omega_O = 300 \text{ об./хв}$. Величина магнітної індукції в робочій зоні складала $B = 0,25 \text{ Тл}$. Кути базування мітчиків:

$p = 60^\circ$, кут $q = 25^\circ$. Оброблення виконували в 3 етапи. Загальний час одного етапу складав 90 с, з них 60 с в режимі «стікання» і обертання проти годинникової стрілки навколо власної осі та 30 с без ВСЕ в режимі «натікання» і обертання за годинниковою стрілкою.

Другу партію мітчиків М10×1,5-6Н обробляли вертикально відносно площини робочої зони верстату, тобто $p = 90^\circ$, кут $q = 0^\circ$. Оброблення виконували із застосуванням магнітно-абразивних порошків двох розмірів: Полімам-Т 200/160 мкм, та Полімам-Т 400/315 мкм. Швидкість руху деталі вздовж кільцевої ванни $V_B = 2,2$ м/с, частота обертання навколо власної осі – $\omega_O = 2750$ об/хв. Величина магнітної індукції у вільній від магнітно-абразивного порошку робочій зоні складала $B = 0,25$ Тл. Загальний час оброблення одного мітчика складав 4,5 хв, з яких 3 хв в режимі «стікання» та 1,5 хв в протилежному напрямку.

Ще для трьох партій мітчиків М10×1,5-6Н різних виробників проводили МАО із застосуванням магнітно-абразивного порошку Полімам-Т з розміром частинок 400/315 мкм. Швидкість руху деталі вздовж кільцевої ванни $V_B = 2,5$ м/с, частота обертання навколо власної осі – $\omega_O = 700$ об/хв. Величина магнітної індукції у вільній від магнітно-абразивного порошку робочій зоні складала $B = 0,25$ Тл. Загальний час оброблення складав 4,5 хв, з яких 3 хв в режимі «стікання» та обертання на задню поверхню мітчика та 1,5 хв в режимі «натікання» та обертання на передню поверхню. Кути нахилу до площини робочої зони мітчиків: $p = 30^\circ$ та $p = 70^\circ$, кут $q = 25^\circ$.

Для дослідження впливу МАО на зміну діаметру мітчиків залежно від часу оброблення використовували 3 партії мітчиків різного діаметру. Партію М12×1,75-6Н обробляли з використанням магнітно-абразивного порошку Полімам-Т 400/315 мкм та Полімам-Т 630/400 мкм. Швидкість руху вздовж кільцевої ванни верстату – $V_B = 2,5$ м/с, частота обертання навколо власної осі – $\omega_O = 700$ об/хв., величина магнітної індукції в робочій зоні складала $B = 0,3$ Тл,

кути базування мітчиків: $p = 70^\circ$, $q = 25^\circ$. Режими оброблення партії M10×1-6H аналогічні як і для мітчиків M12 за виключенням зернистості магнітно-абразивного порошку, яка складала 200/160 мкм. Режими оброблення партії мітчиків M6×0,75-6H: магнітно-абразивний порошок – Полімам-Т 200/160 мкм, швидкість руху вздовж кільцевої ванни верстату – $V_B = 2,5$ м/с, частота обертання навколо власної осі – $\omega_O = 500$ об/хв., величина магнітної індукції в робочій зоні складала $B = 0,25$ Тл, кут $p = 70^\circ$, $q = 25^\circ$. Всі партії мітчиків та режими їх оброблення представлено у зведеній таблиці 4.1.

Таблиця 4.1.

Режими оброблення мітчиків

№ партії	Мітчик	Кількість одиниць	МАП	Час оброблення, хв	V_B , м/с	ω_O , об/хв	B , Тл	p°	q°
1	M12×1,75-6H	9	Полімам-Т 200/160 мкм	2	3	300	0,25	$\frac{45}{65}$	25
2	M10×1,5-6H з підточуванням	9	Полімам-М 400/315 мкм Царамам 630/400 мкм Полімам-Т 400/315 мкм ПР Р6М5 200/160 мкм	4,5	2,5	300	0,25	60	25
3	M10×1,5-6H	9	Полімам-Т 200/160 мкм Полімам-Т 400/315 мкм	4,5	2,2	2750	0,25	90	0
4	M10×1,5-6H	3	Полімам-Т 400/315 мкм	4,5	2,5	700	0,25	30	25
5	M10×1,5-6H з підточуванням	3						70	
6	M10×1,5-6H	3							
7	M12×1,75-6H	5	Полімам-Т 400/315 мкм Полімам-Т 630/400 мкм	-	2,5	700	0,3	70	25
8	M10×1-6H	5	Полімам-Т 200/160 мкм	-	2,5	700	0,3	70	25
9	M6×0,75-6H	5	Полімам-Т 200/160 мкм	-	2,5	500	0,25	70	25

4.2. Експериментальне дослідження інтенсивності оброблення

Для візуалізації інтенсивності МАО мітчиків при різних кутах їх нахилу до площини робочої зони було розроблено методику визначення зон «перекривання» та зон активної взаємодії магнітно-абразивного порошку з оброблюваними поверхнями. Для цього на робочі частини мітчиків наносили тонке покриття темного кольору. Експериментально визначено час для диспергування покриття з поверхні циліндричного зразка, використовуючи режими оброблення, ідентичні режимам оброблення мітчиків. Час оброблення зразка склав 30 с.

За результатами розрахунків було обрано для оброблення кути $p = 30^\circ$ та $p = 70^\circ$. За аналітичними розрахунками, при $p = 30^\circ$ обробляються лише кромки на циліндричній частині та забірному конусі мітчика. При такому розташуванні параметр інтегральної інтенсивності за дотичною складовою швидкості оброблення у вище зазначених зонах за повний цикл процесу МАО складає $IV_\tau = 1000-1200 \text{ м}^2/\text{с}$, а за нормальною складовою – $IV_n = 400 \text{ м}^2/\text{с}$. При $p = 70^\circ$ обробляється весь профіль різальної кромки, причому параметр інтегральної інтенсивності за дотичною складовою швидкості на циліндричній частині РК та на забірному конусі буде $IV_\tau = 800 \text{ м}^2/\text{с}$, за нормальною складовою – $IV_n = 750 \text{ м}^2/\text{с}$.

Дослідження проводили на мітчиках М10 однієї партії. Оброблення виконували із застосуванням магнітно-абразивного порошку Полімам-Т з розміром частинок 400/315 мкм. В якості змочувально-охолоджуючого технологічного середовища використовували олійну рідину марки АСФОЛ. Швидкість руху деталі вздовж кільцевої ванни $V_B = 2,5 \text{ м/с}$, частота обертання навколо власної осі – $\omega_O = 700 \text{ об/хв}$. Величина магнітної індукції у вільній від магнітно-абразивного порошку робочій зоні складала $B = 0,25 \text{ Тл}$. Для відновлення форми магнітно-абразивного інструменту в процесі оброблення використовували відновлювальний стрижневий елемент з немагнітного

матеріалу діаметром 8 мм [41]. Отримані результати дослідження представлено на рис. 4.1.

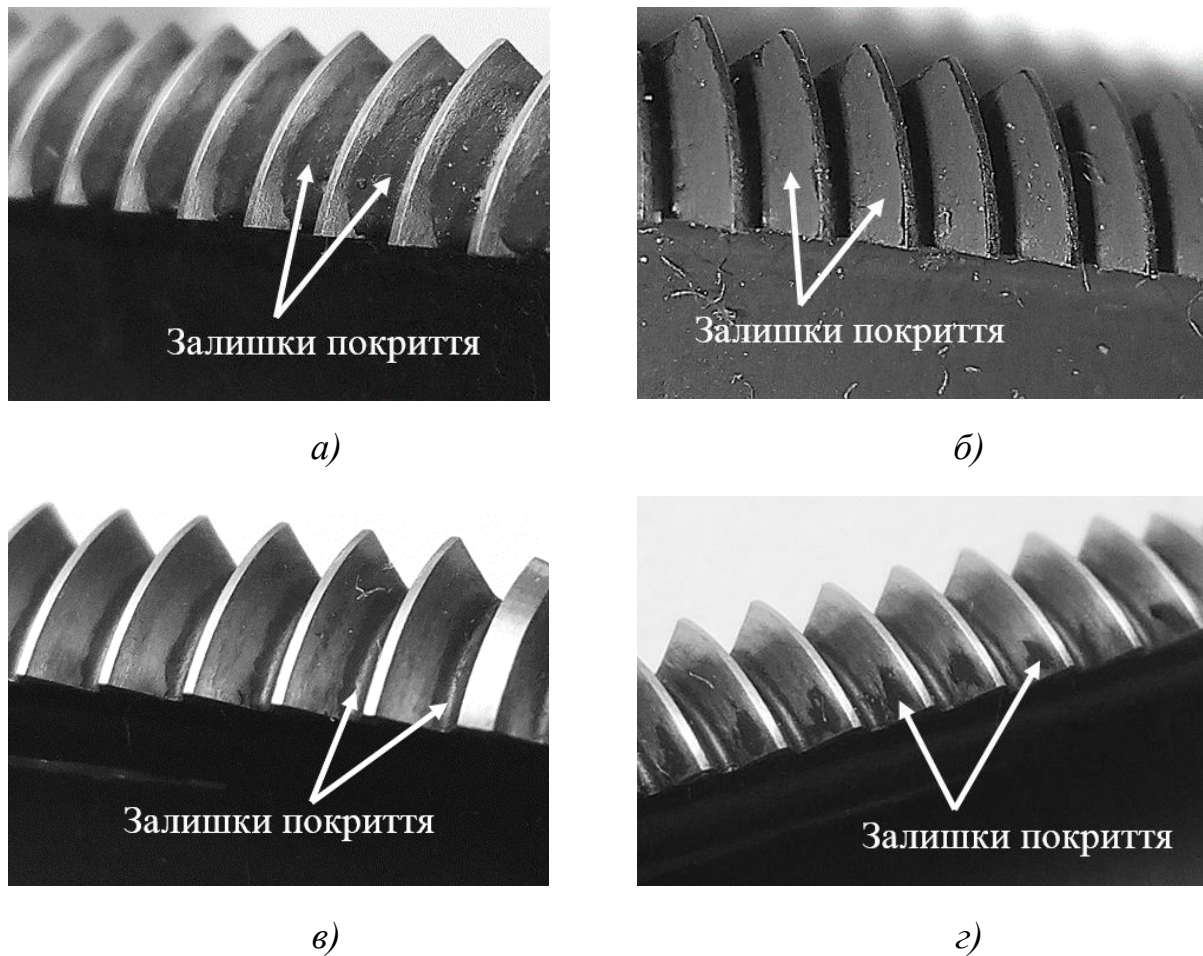


Рис. 4.1. Зовнішній вигляд робочої частини мітчиків з попередньо нанесеним покриттям після МАО: а) $p = 30^\circ$, вигляд з боку торця ;б) $p = 30^\circ$, вигляд з боку хвостовика; в) $p = 70^\circ$, вигляд з боку торця; г) $p = 70^\circ$, вигляд з боку хвостовика

Показано, що при $p = 30^\circ$ активне оброблення відбувається лише на циліндричній частині зубців та на забірному конусі. Більша частина профілю різальної кромки залишилась з нанесеним покриттям, що свідчить про наявність зон «перекривання» та недостатньої взаємодії порошку з поверхнею деталі. Натомість, при обробленні з кутом $p = 70^\circ$ зони «перекривання» майже відсутні. За повний цикл оброблення залишки покриття ідентифікуються лише в зоні внутрішнього діаметру інструменту, який не приймає активної участі в різанні

та майже не зношується при експлуатації мітчика і відповідно вимоги до якості поверхні невисокі. Такі результати підтверджують результати розрахунків про наявність тіньових зон та зон «перекривання» і дозволяють контролювати, яким чином кут p впливає на якість оброблення поверхонь мітчиків.

4.3. Вплив МАО на шорсткість робочих поверхонь мітчиків

Зменшення шорсткості робочих поверхонь мітчиків супроводжується зменшенням сил тертя в процесі різання між інструментом та оброблюваною поверхнею, інструментом і стружкою, що призводить до зменшення крутних моментів та напружень при різанні, сприяє створенню кращих умов для роботи. Але при малому значенні шорсткості слід враховувати можливу адгезію задньої поверхні інструменту із поверхнею оброблюваної деталі, що призведе до заклинювання та поломки інструменту. Підвищена шорсткість поверхонь мітчиків після звичайного заточування шліфуванням, наявність задирок та припалів істотно знижує їх міцність. Виступи мікронерівностей на різальних кромках через малу їх механічну міцність руйнуються в перші секунди різання. Западини мікронерівностей є місцем зародження мікротріщин, які розростаються в процесі різання і призводять до утворення сколів та руйнування зубців інструмента [4, 20, 24, 49, 54, 85, 118].

Для визначення впливу МАО на шорсткість робочих поверхонь мітчиків та раціональних режимів оброблення, проведено дослідження процесу при різних кутах базування інструменту в робочій зоні та з використанням різних магнітно-абразивних матеріалів. Час оброблення, магнітна індукція в робочій зоні верстату та частота обертання шпинделя верстату вибрано за рекомендаціями [40, 41, 70, 71, 86], що ґрунтуються на результатах досліджень МАО осьового та кінцевого різального інструменту.

4.3.1. Формування шорсткості залежно від типу магнітно-абразивного матеріалу

Дослідження МАО мітчиків М10×1,5-6Н з підточуванням передньої поверхні при використанні різних МАМ показали, що МАО порошком Полімам-М 400/315 мкм призводить до збільшення шорсткості на задній поверхні з $Ra = 0,57$ мкм до $Ra = 0,82$ мкм, на передній поверхні шорсткість не змінилася. При обробленні порошком Царамам 630/400 мкм шорсткість на задній та передній поверхнях майже не змінилася. Шорсткість на задній поверхні зменшилася з $Ra = 0,57$ мкм до $Ra = 0,4$ мкм, а на передній поверхні з $Ra = 0,13$ мкм до $Ra = 0,1$ мкм після оброблення мітчиків порошком Потімам-Т 400/315мкм. Мітчики, оброблені порошком Царамам 630/400 мкм додатково пройшли цикл оброблення порошком ПР Р6М5 200/160 мкм, частинки якого менші та мають сферичну форму (рис.3.7). Після додаткового оброблення, шорсткість на задній поверхні збільшилася з $Ra = 0,55$ мкм до $Ra = 0,72$ мкм, а на передній поверхні зменшилася з $Ra = 0,14$ мкм до $Ra = 0,105$ мкм. Результати досліджень та вимірювань представлені у вигляді гістограм на рис. 4.2-4.3.

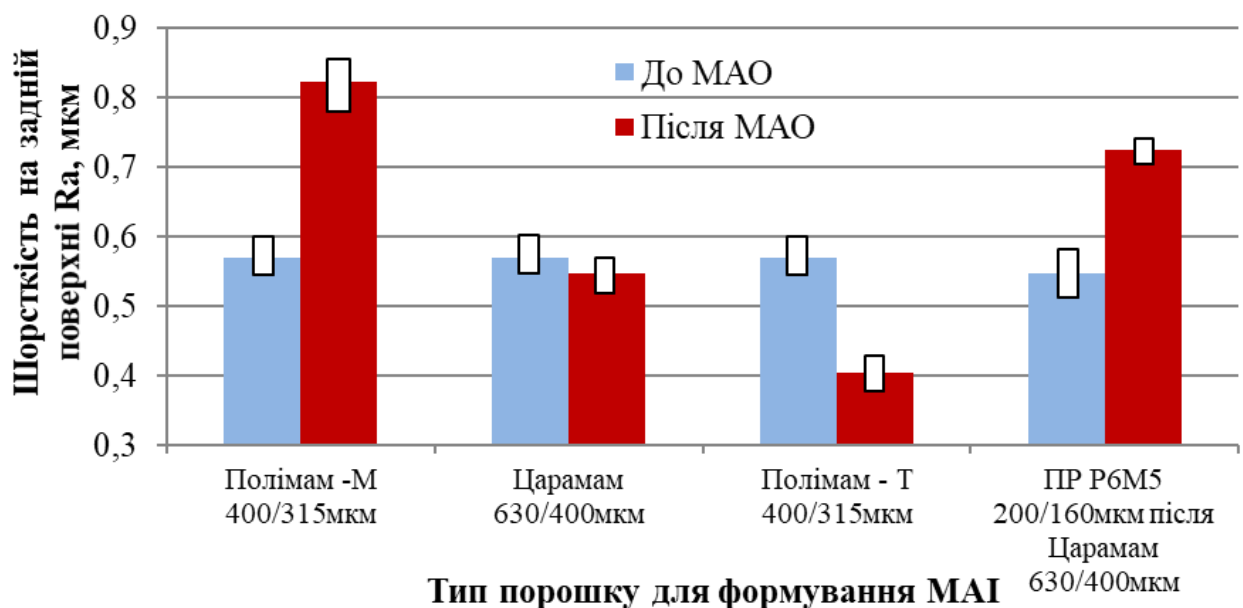


Рис. 4.2. Вплив МАО на шорсткість задньої поверхні мітчиків

Аналіз отриманих даних показав, що найкращий результати по зменшенню параметра шорсткості Ra отримано при використанні осколкових порошків. Процес MAO округлими порошками призводить до розгладжування мікрориступів шорсткуватої поверхні з одночасним видаленням тонкого пластично деформованого шару, який сформувався при фінішному шліфуванні робочих поверхонь мітчиків.

Отримані результати досліджень цілком очікувані. Найкращий результат зміни шорсткості при однакових умовах оброблення показав порошок Полімам-Т 400/315 мкм. Найбільш важливою характеристикою МАП для зменшення шорсткості є різальна здатність, як сукупність показників: питомого знімання матеріалу, збереження різальної здатності протягом часу та досягнення необхідної шорсткості поверхні.

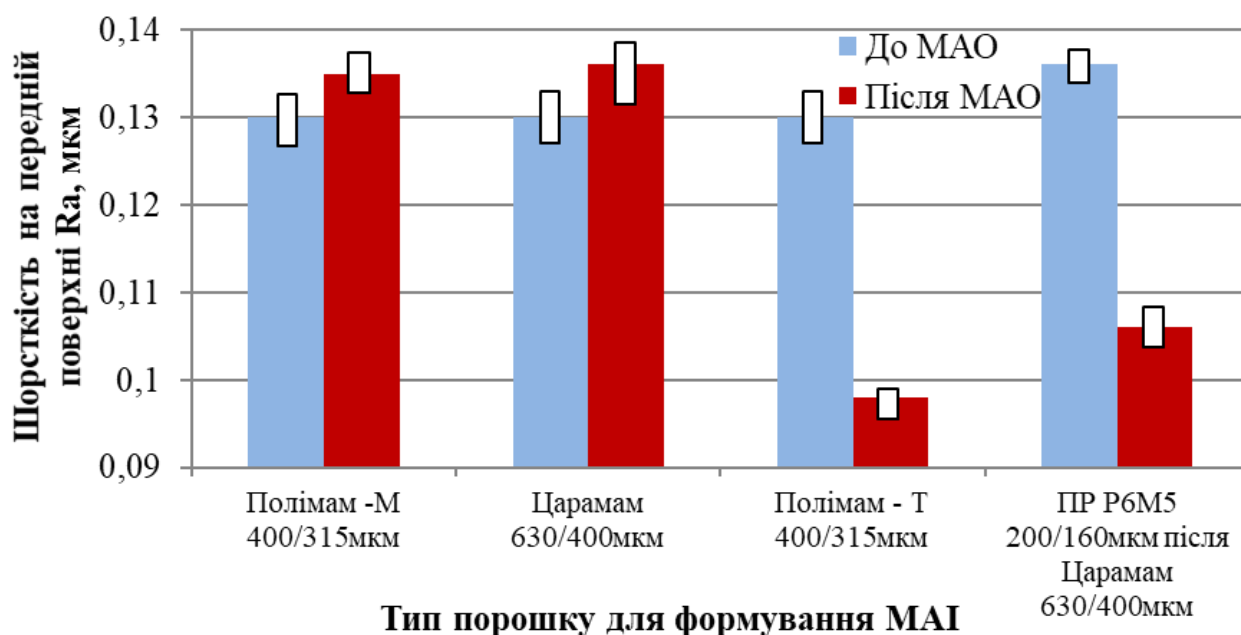


Рис. 4.3. Вплив MAO на шорсткість передньої поверхні мітчиків

Дослідження зміни шорсткості та питомого масового знімання матеріалу з поверхні виробів, виготовлених з різних матеріалів, які обробляли в умовах великих магнітних зазорів [40, 57] показали суттєву перевагу порошків Полімам-Т та Феромап. Для зменшення шорсткості різальних інструментів, виготовлених із швидкорізальної сталі, найкращий результат також показало

МАО порошком Полімам-Т [5, 41, 86]. Отримані результати зміни шорсткості робочих поверхонь мітчиків не суперечать результатам досліджень в [5, 30, 111, 114] та доповнюють їх.

4.3.2. Вплив кута нахилу мітчиків p на величину шорсткості поверхонь

Результати аналітичних розрахунків в (розділ 3) показали, що якість та інтенсивність оброблення поверхонь мітчиків буде суттєво залежати від кута їх нахилу до площини робочої зони верстату p . Наступні дослідження проводили для різних партій мітчиків при різних кутах p з метою визначення впливу параметру на шорсткість поверхонь та вибору його оптимального значення.

Магнітно-абразивне оброблення партії мітчиків M12×1,75-6H при кутах базування $p = 45^\circ$, $q = 25^\circ$ призводить до зменшення шорсткості на передніх поверхні та хвостовику з $Ra = 1,3$ мкм до $Ra = 0,1-0,19$ мкм, а також до зменшення шорсткості на задніх поверхнях з $Ra = 1,2$ мкм до $Ra = 0,7$ мкм.

Результати зміни параметру Ra при $p = 45^\circ$ представлені у вигляді гістограм на рис.4.4.

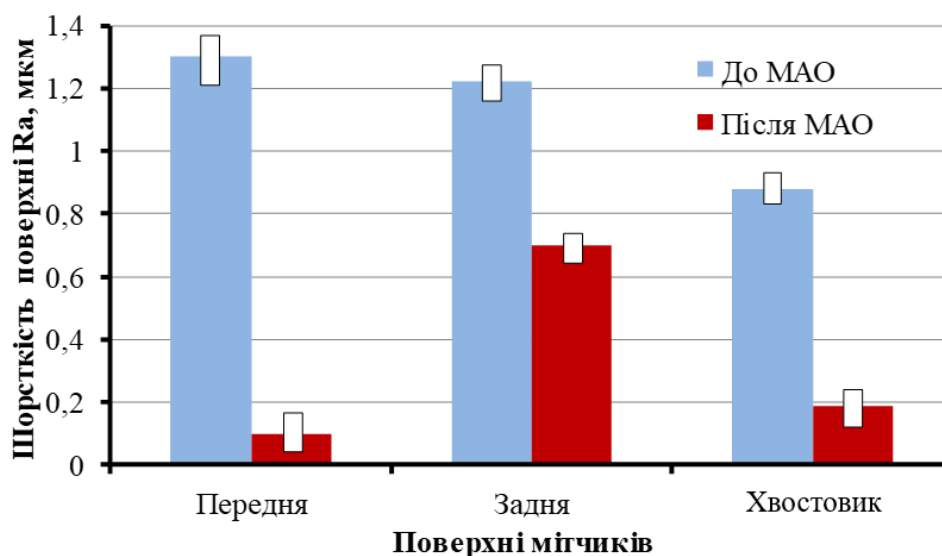


Рис. 4.4. Вплив МАО на шорсткість мітчиків при $p=45^\circ$

Після МАО мітчиків при $p = 65^\circ$ та $q = 25^\circ$ шорсткість на передніх поверхнях зменшилась з $Ra = 1,3$ мкм до $Ra = 0,1$ мкм, на хвостовику з $Ra = 0,9$ мкм до $Ra = 0,4$ мкм, а на задніх поверхнях з $Ra = 1,2$ мкм до $Ra = 0,9$ мкм (рис. 4.5).

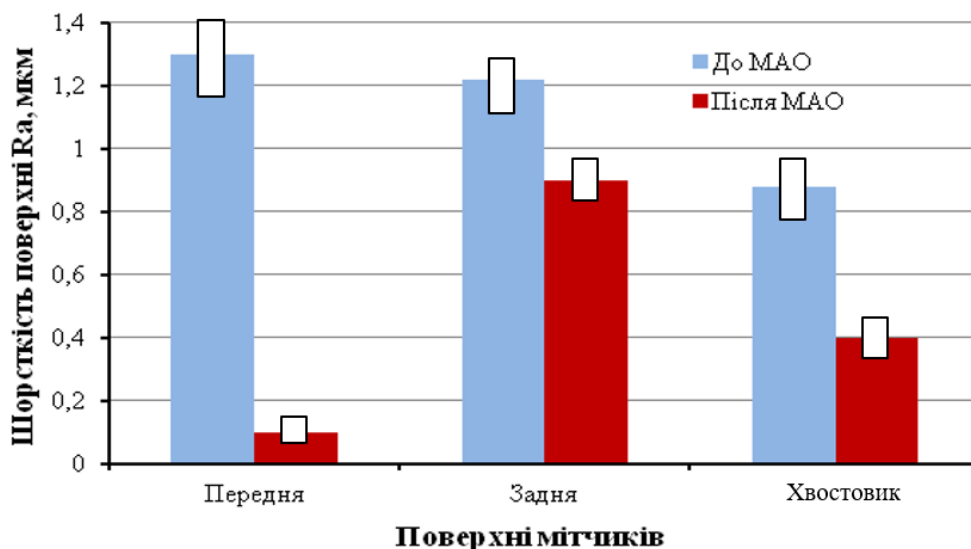


Рис. 4.5. Вплив МАО на шорсткість мітчиків при $p=65^\circ$

Результати вимірювання шорсткості на поверхнях мітчиків ще трьох партій М10×1,5-6Н різних виробників до та після МАО з кутами $p = 30^\circ$ та $p = 70^\circ$ представлено на рис. 4.6-4.8.

Найбільшу шорсткість по задній поверхні $Ra = 1,2$ мкм фіксували на мітчиках українського виробника. Шорсткість на задній поверхні мітчиків китайського та японського виробників склала $Ra = 0,65-0,7$ мкм.

Шорсткість на передній поверхні у вихідному стані у мітчиків українського виробника — $Ra = 0,64$ мкм, китайського — $Ra = 0,62$ мкм, японського — $Ra = 0,3$ мкм.

При обробленні мітчиків українського виробника, шорсткість на задній поверхні зменшилася до $Ra = 0,79$ мкм при $p = 30^\circ$ та до $Ra = 0,85$ мкм при $p = 70^\circ$. На передній поверхні після МАО шорсткість зменшилась з $p = 30^\circ$ до $Ra = 0,3$ мкм, а при $p = 70^\circ$ — до $Ra = 0,32$ мкм (рис. 4.6).

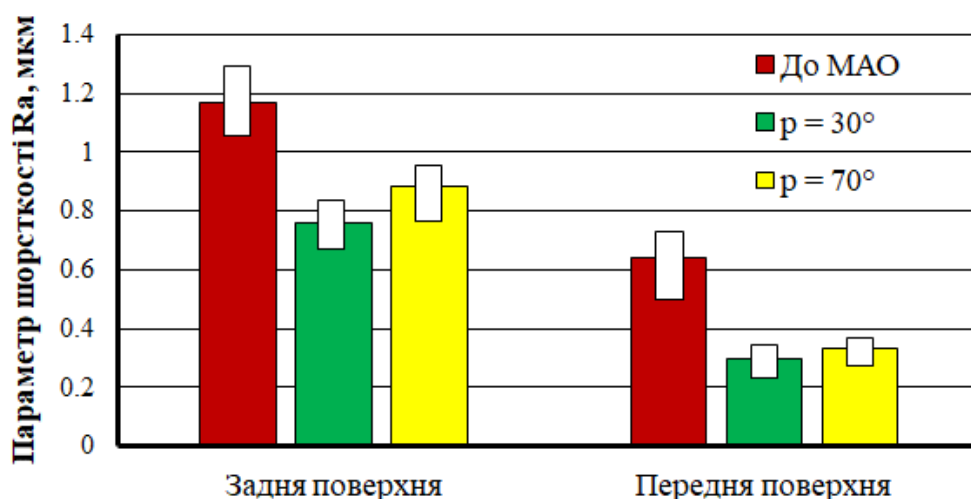


Рис. 4.6. Вплив MAO на шорсткість мітчиків українського виробника

Шорсткість на задній поверхні мітчиків китайського виробника після MAO з кутом $p = 30^\circ$ зменшилась до $Ra = 0,4$ мкм, а з кутом $p = 70^\circ$ всього до $Ra = 0,58$ мкм. На передній поверхні шорсткість після MAO склала $Ra = 0,3$ мкм як для $p = 30^\circ$ так і для $p = 70^\circ$ (рис. 4.7).

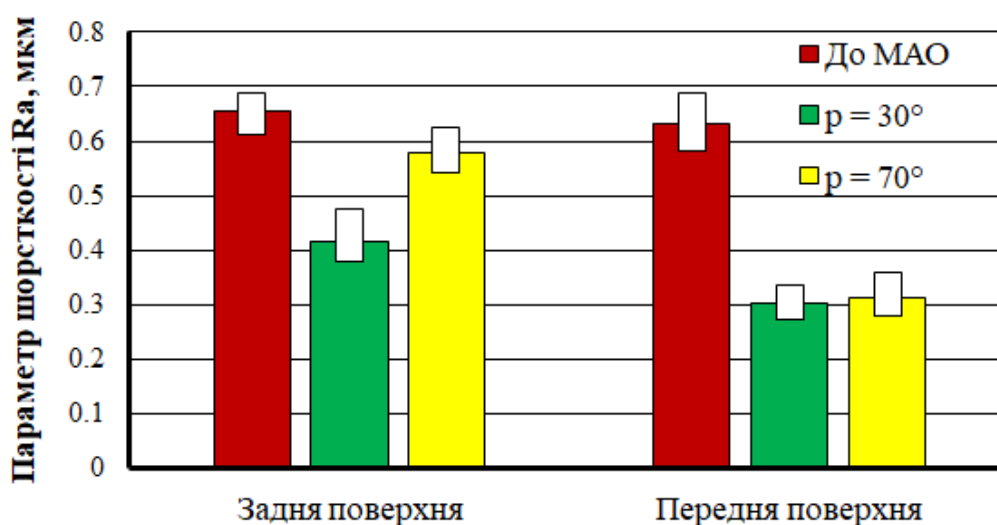


Рис. 4.7. Вплив MAO на шорсткість мітчиків китайського виробника

Результати вимірювання шорсткості мітчиків японського виробника представлено на рис. 4.8. Шорсткість на задній поверхні при MAO з $p = 30^\circ$ зменшилася до $Ra = 0,49$ мкм, а з $p = 70^\circ$ до $Ra = 0,56$ мкм. На передні поверхні шорсткість після MAO при обох варіантах дещо збільшилася до $Ra = 0,34$ –

0,38 мкм. Збільшення шорсткості пояснюється тим фактом, що МАП, яким обробляли мітчики – Полімам-Т з розміром частинок 400/315 мкм, ускладнено отримати шорсткість, кращу за $Ra = 0,3$ мкм [56, 57].

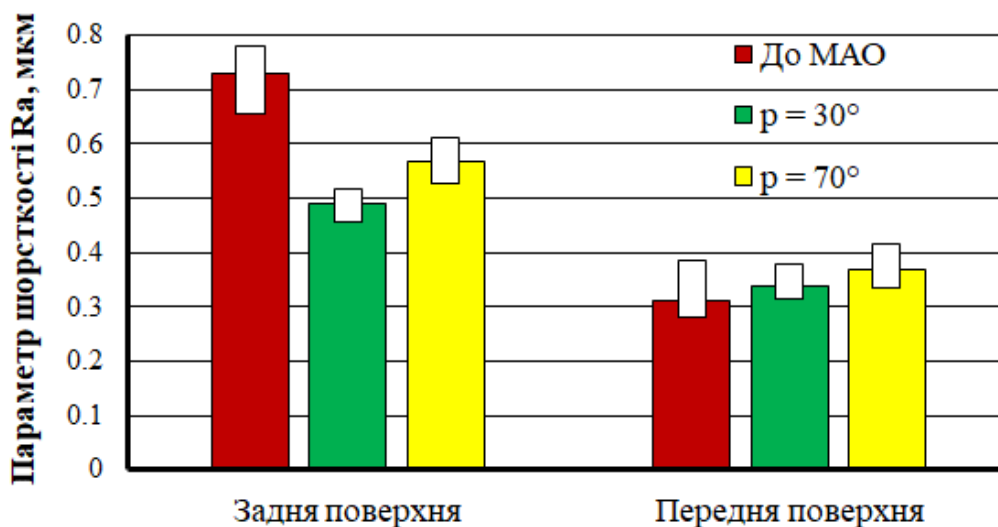


Рис. 4.8. Вплив MAO на шорсткість мітчиків японського виробника

Така розбіжність результатів по параметру шорсткості на задній поверхні при різниці кутів базування мітчиків у робочій зоні верстату може бути пояснена з результатів аналізу значень величин інтегральних інтенсивностей швидкостей активного руху МАП відносно оброблюваних поверхонь [96]. Так, інтегральна інтенсивність за дотичною складовою швидкості оброблення, яка в основному і впливає на чистоту поверхні, на задній циліндричній поверхні інструменту при $p = 30-45^\circ$ дорівнює $IV\tau = 1000-1200 \text{ м}^2/\text{с}$, а при $p = 65-70^\circ$ – $IV\tau = 800 \text{ м}^2/\text{с}$, що на 30-35% менше. Таким чином показано, що експериментальні данні підтверджують результати аналітичного моделювання.

Для робочих поверхонь мітчиків немає потреби зменшення шорсткості нижче $Ra = 0,1$ мкм, тому що виникає вірогідність активної адгезійної взаємодії матеріалу інструменту з оброблюваним металом, що може призвести до передчасного руйнування мітчиків та бракування деталей [24].

Ще одну партію мітчиків обробили вертикально до площини робочої зони верстату, тобто при $p = 90^\circ$. За рекомендаціями, наведеними в [56, 57], з

врахуванням шорсткості робочих поверхонь попередньо необроблених мітчиків, оптимальним для полірування магнітно-абразивним методом є розмір порошку 200/160 мкм, але для порівняння результатів обрано також порошок з розміром зерна 400/315 мкм. Дослідження проводили на дев'яти мітчиках однієї партії, номери та параметри оброблення яких представлено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2.

Параметри оброблення мітчиків

№ мітчика	Порошок для оброблення
1	Без МАО
2	Без МАО
3	Без МАО
4	Полімам-Т 200/160 мкм
5	Полімам-Т 200/160 мкм
6	Полімам-Т 200/160 мкм
7	Полімам-Т 400/315 мкм
8	Полімам-Т 400/315 мкм
9	Полімам-Т 400/315 мкм

В результаті експериментальних досліджень і статистичної обробки результатів вимірювань встановлено, що шорсткість на передній поверхні мітчиків після МАО порошком Полімам-Т 200/160 мкм зменшилась в середньому в 2 рази, а порошком Полімам-Т 400/315 мкм зменшилась на 30-40%.

Результати зміни шорсткості на передній поверхні мітчиків після МАО за умов їх вертикального розташування в робочій зоні представлено на рис. 4.9.

Шорсткість на задній поверхні мітчиків після МАО порошком Полімам-Т 200/160 мкм зменшилася на 60-70%, а порошком Полімам-Т 400/315 мкм зменшилась більш ніж на 70%. Результати зміни шорсткості на задній поверхні після МАО представлено на рис. 4.10.

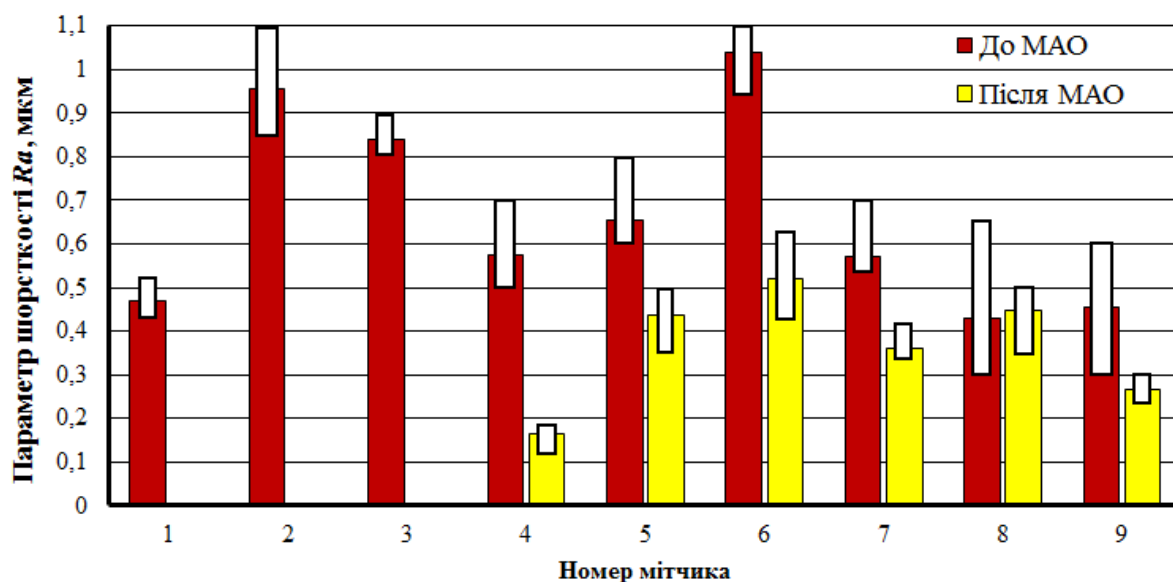


Рис. 4.9. Шорсткість на передній поверхні мітчиків

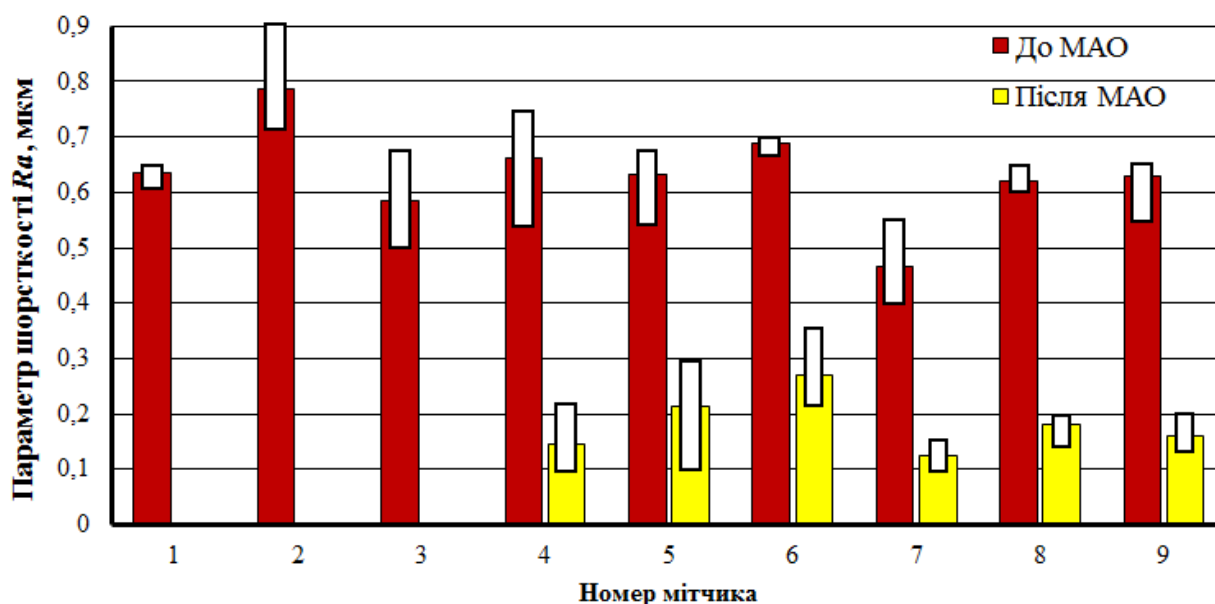


Рис. 4.10. Шорсткість на задній поверхні мітчиків

На задній поверхні мітчиків при обробленні у вертикальному положенні величина тангенціальної складової швидкості руху частинок по поверхні набагато більша ніж на передній, що зумовлює інтенсивне полірування поверхні і призводить до значного зменшення шорсткості.

Встановлено, що MAO призводить до значного зменшення шорсткості робочих поверхонь мітчиків, при чому на передній поверхні менше значення шорсткості спостерігали при гострішому куті p , коли тангенціальна складова

інтенсивність оброблення досягає свого максимуму, а на задній поверхні це значення спостерігається при вертикальному розташуванні мітчиків до площини робочої зони. Результати досліджень дозволяють контрольовано змінювати шорсткість поверхонь за допомогою МАО та прогнозувати результат.

4.4. Вплив МАО на радіус округлення різальних кромок мітчиків

Форма та розміри РК мають значний вплив на процес різання. В процесі оброблення на кромки діють значні механічні та термічні навантаження. Тому для підвищення продуктивності та якості оброблення необхідно велику увагу приділяти саме стану РК. Після шліфування та заточування РК гострі, але це викликає низьку механічну міцність. На РК присутні сколи, викришування, мікротріщини, підвищена шорсткість. Все це може спричинити передчасну втрату роботоздатності інструменту. При підготовці РК можливо вирішити дані недоліки та сформувати необхідний радіус округлення та форму РК для підвищення їх стійкості при механічних навантаженнях.

Таким чином, для покращення процесу різання та збільшення продуктивності оброблення, також необхідно формувати радіуси округлення РК. Саме на РК припадає основний механічний та термічний вплив в процесі оброблення, що може викликати передчасну втрату нею своїх властивостей. Це приводить як до погіршення якості оброблення, так і до повної відмови РІ.

Одним з ефективних та комплексних методів підготовки РК є саме метод МАО, який дозволяє формувати не тільки радіус округлення РК [41, 89, 92, 112, 130], а й необхідну форму [23], що має безпосередній вплив на стійкість інструменту.

Дослідження впливу радіусів округлення на роботоздатність інструменту показали, що значення параметру повинні бути в діапазоні 15-50 мкм в залежності від характеристик оброблюваного матеріалу та режимів різання[4, 5, 40, 41].

Вплив процесу МАО на зміну величини радіусів округлення РК мітчиків М10×1,5-6Н з підточуванням передньої поверхні, які обробляли різними порошками при $p = 60^\circ$ представлено у вигляді гістограм на рис. 4.11.

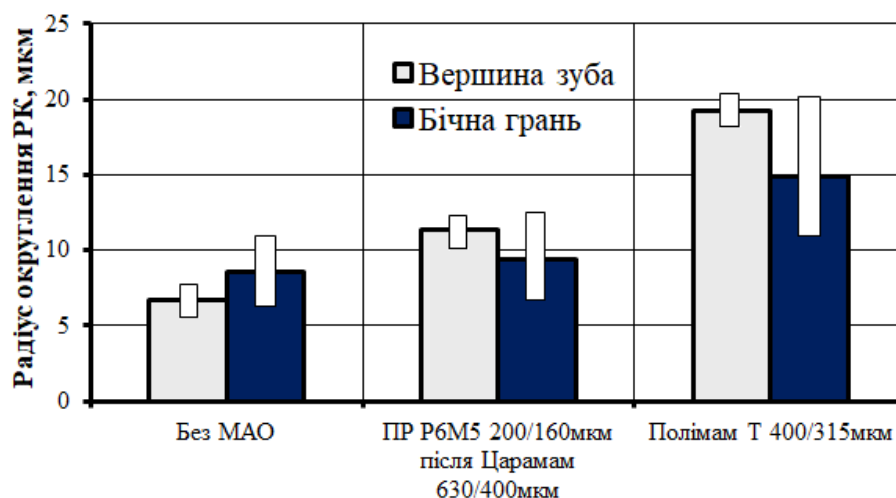
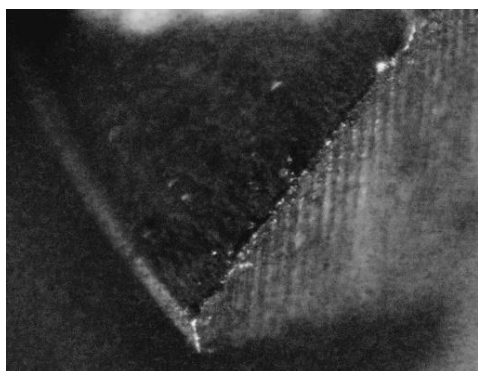


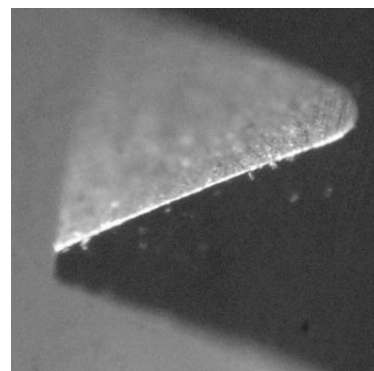
Рис. 4.11. Вплив МАО на радіус округлення РК

Показано, що МАО мітчиків, які обробляли порошками Царамам 630/400 мкм, а потім ПР Р6М5 200/160 мкм, призводить до збільшення радіуса округлення РК до 12 мкм, а у мітчиків оброблених порошком Полімам-Т 400/315 мкм радіус округлення РК збільшився до 20 мкм. Зі збільшення часу оброблення можливо досягнути необхідного значення радіусів.

При МАО мітчиків відбувається округлення РК, формується рівномірна РК без концентраторів напружень. Зовнішній вигляд зубців мітчиків до та після МАО представлено на рис. 4.12.



До МАО



Після МАО

Рис. 4.12. Зовнішній вигляд зубців мітчика до та після МАО

Показано, що МАО забезпечує не тільки заокруглення різальних кромки до значень 15-20 мкм, але й видалення задирок та завусинок.

При обробленні мітчиків М12×1,75-6Н з $p = 45^\circ$, величина округлення різальних кромки збільшилася на 14% і становить 31-32 мкм. Результати вимірювань радіусів округлення РК представлені у вигляді гістограм на рис. 4.13.

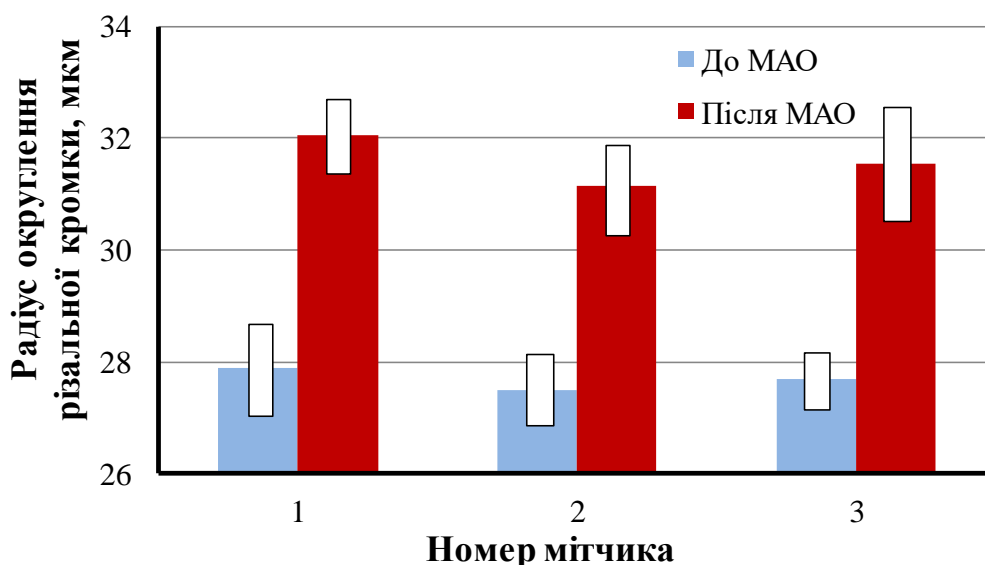


Рис. 4.13. Вплив МАО на радіуси округлення РК при $p=45^\circ$

При розташуванні мітчиків у робочій зоні верстату з $p = 65^\circ$, величина округлення різальних кромки збільшилася на 5% і становить 28-29 мкм (рис. 4.14).

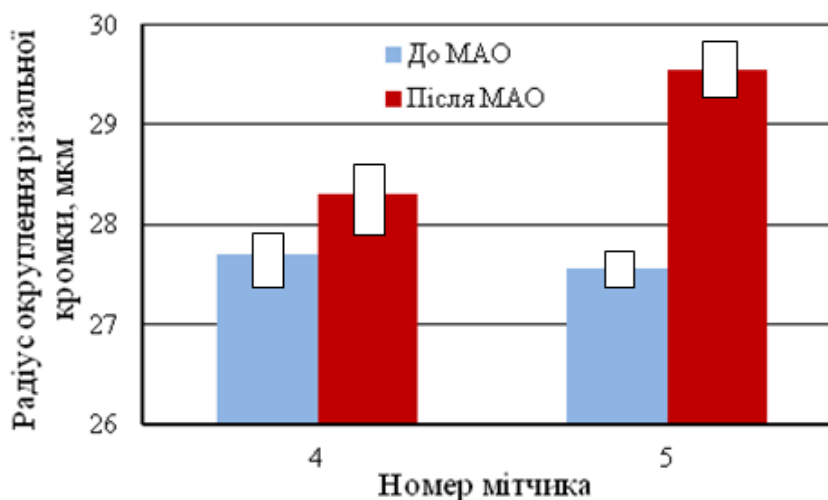


Рис. 4.14. Вплив МАО на радіуси округлення РК при $p=65^\circ$

Вплив процесу МАО з вертикальним розташуванням мітчиків М10×1,5-6Н до площини робочої зони верстату на зміну величини радіусів округлення їх РК представлено у вигляді гістограми на рис. 4.15.

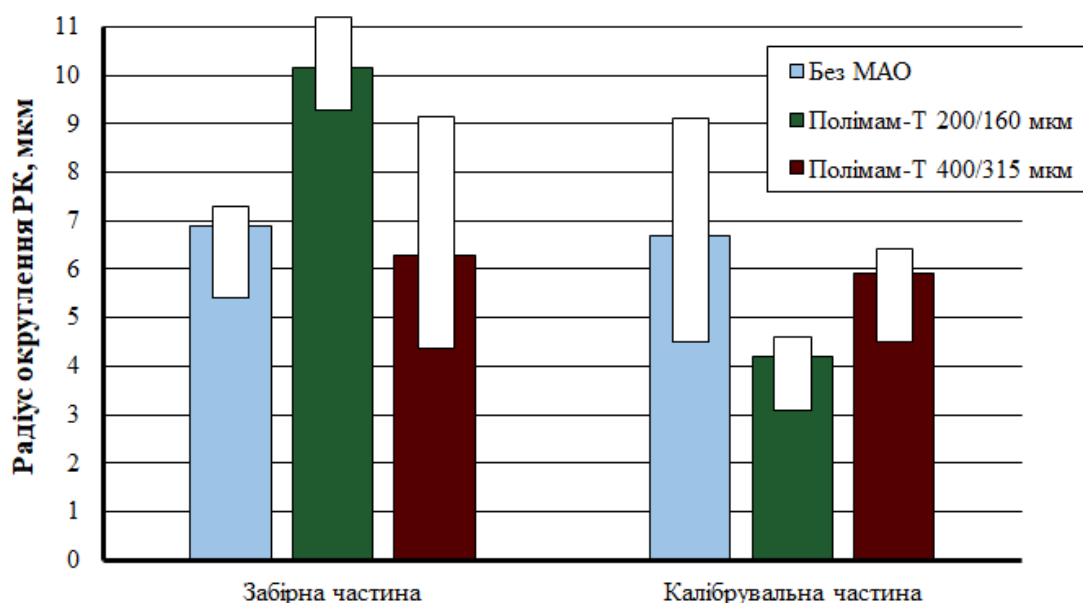


Рис. 4.15. Вплив МАО на радіуси округлення РК при $p=90^\circ$

Показано, що МАО з вертикальним розташуванням мітчиків у робочій зоні та порошком Поліам-Т 200/160 мкм призводить до збільшення радіусів округлення РК на забірній частині мітчика на 30%, що повинно привести до запобігання зношення та викришування зубців, на калібрувальній – до зменшення на 40%, що, при відносно малих значеннях зусиль різання та припуску в цій частині, повинно сприяти підвищенню точності та чистоти поверхні витків різьби. Після МАО порошком Поліам-Т 400/315 мкм радіуси округлення на забірній частині мітчика майже не змінилися, а на калібрувальній – зменшилися на 10-15%.

4.5. Вплив МАО на поверхневу твердість мітчиків

Після фінішних операцій виготовлення, мітчики можуть мати несприятливий напружений стан поверхневих шарів, що значно знижує їх стійкість до навантажень, які виникають в процесі їх роботи. Тому для

підвищення роботоздатності мітчиків важливим є формування сприятливого напруженого стану та підвищення твердості та міцності поверхневих шарів. Магнітно-абразивне оброблення мітчиків дозволяє не тільки знижувати шорсткість робочих поверхонь інструменту, а й видаляти дефектний шар, що утворився при виготовленні (заточуванні) з подальшим формуванням нового зміцненого шару. Усе це в сукупності веде до поліпшення процесу різання і підвищення експлуатаційних властивостей контактних поверхонь зубців інструменту.

4.5.1. Вплив типу магнітно-абразивного матеріалу на твердість робочих поверхонь

Дослідження поверхневої твердості мітчиків $M10 \times 1,5-6H$ з підточуванням передньої поверхні після МАО порошковими матеріалами різних типів наведено у вигляді гістограм на рис. 4.16.

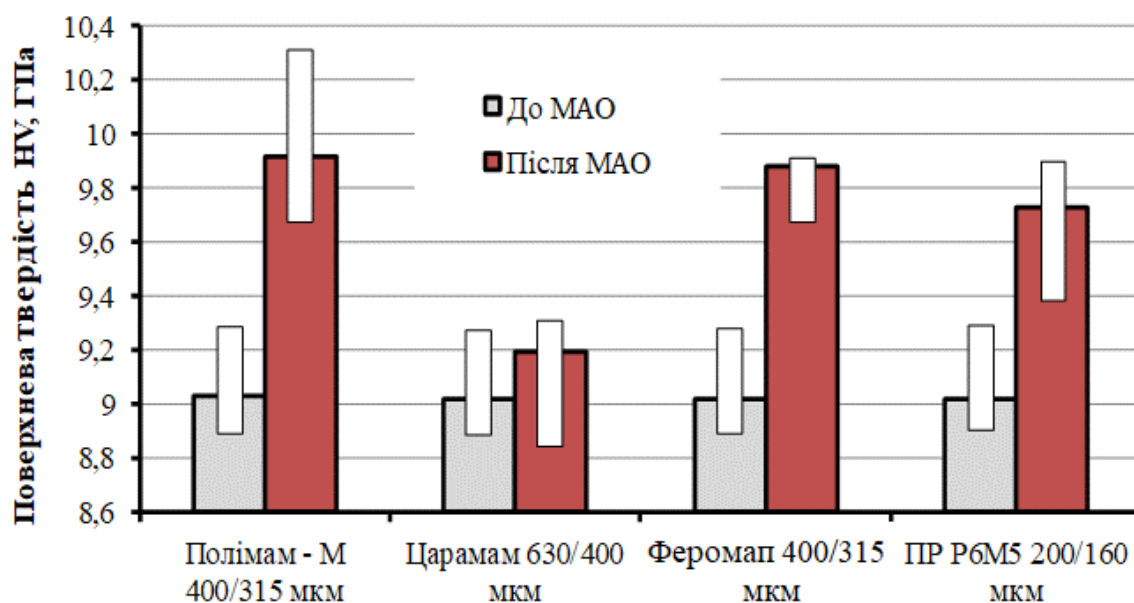


Рис. 4.16. Вплив МАО на поверхневу твердість HV робочої частини мітчиків

Вихідна поверхнева твердість робочих поверхонь мітчиків становила $HV = 9$ ГПа. Встановлено, що при обробленні магнітно-абразивним інструментом, сформованим з порошків Полімам-М 400/315 мкм та Полімам-Т

400/315 мкм поверхнева твердість збільшилася на 10% до $HV = 9,9-10$ ГПа, при обробленні ПР Р6М5 200/160 мкм – на 8% до $HV = 9,7-9,8$ ГПа, при обробленні Царамам 630/400 мкм – на 2% до $HV = 9,2$ ГПа.

Такі результати поверхневої твердості пов'язані з умовами контакту частинок МАІ з поверхнею, а саме величиною зони реального контакту мікрорізальних кромek окремих частинок з оброблюваною поверхнею в процесі МАО, яка залежить від середнього радіусу РК частинок і відповідно до спроможності здійснювати зміцнювальне оброблення [40, 69].

4.5.2. Вплив кута нахилу мітчиків p на твердість робочих поверхонь

Результати досліджень поверхневої твердості мітчиків М12×1,75-6Н наведено у вигляді гістограм на рис. 4.17.

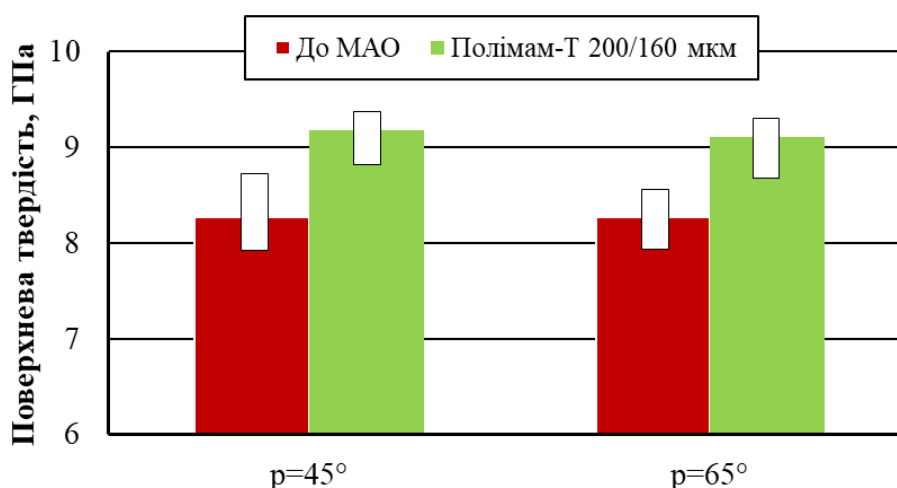


Рис. 4.17. Вплив МАО на поверхневу твердість HV робочої частини мітчиків

Показано, що після МАО, як при $p = 45^\circ$ та і при $p = 65^\circ$ відбувається збільшення поверхневої твердості мітчиків з $HV = 8,2$ ГПа до $HV = 9,0-9,2$ ГПа.

Інтегральна інтенсивність за нормальною складовою швидкості оброблення при $p = 45^\circ$ на циліндричній частині складає $IV_n = 500$ м²/с, а при $p = 65^\circ$ – $IV_n = 650$ м²/с. Значення IV_n для обох випадків майже однакові, тому отримані результати мають однакові значення твердості після МАО.

Результати дослідження поверхневої твердості робочої частини мітчиків M10×1,5-6H різних виробників до та після МАО представлено у вигляді гістограми на рис. 4.18.

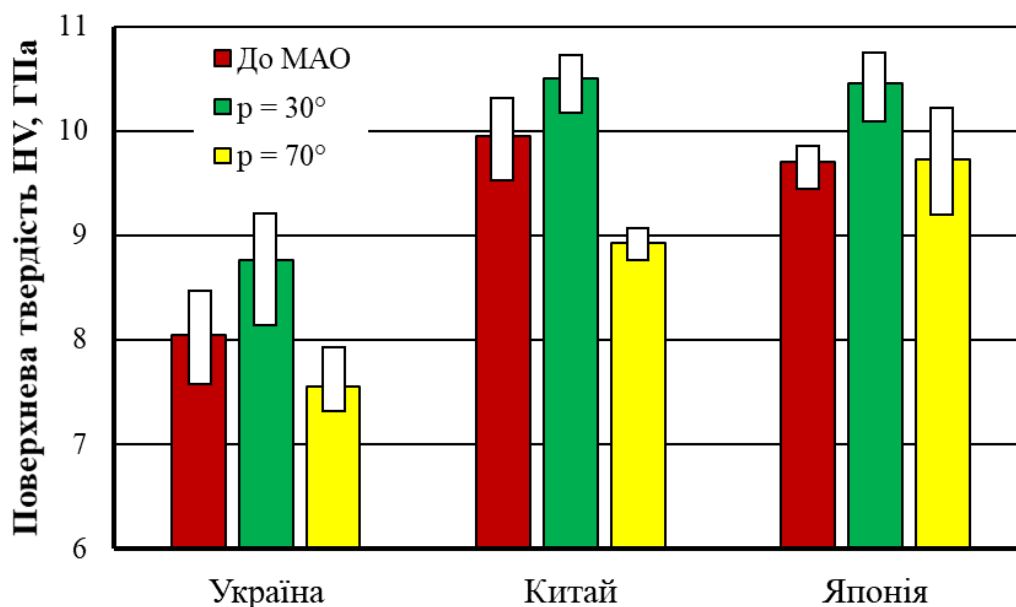


Рис. 4.18. Вплив МАО на поверхневу твердість HV робочої частини мітчиків M10 різних виробників

У вихідному стані, поверхнева твердість робочої частини мітчиків українського виробника була найменшою – $HV = 8$ ГПа, китайського та японського виробників – на рівні $HV = 9,8-10$ ГПа. Після МАО при $p = 30^\circ$ мікротвердість мітчиків збільшилась на 10%: українського виробника – до $HV = 8,8$ ГПа, китайського та японського виробників – до $HV = 10,5$ ГПа. Після МАО при $p = 70^\circ$ поверхнева твердість робочої частини мітчиків всіх виробників зменшилась: українського – до $HV = 7,5$ ГПа, китайського – до $HV = 8,9$ ГПа, японського – до $HV = 9,8$ ГПа. Інтегральна інтенсивність за нормальною складовою швидкості оброблення при $p = 70^\circ$ на циліндричній частині складає $IVn = 750 \text{ м}^2/\text{с}$, що в 2 рази перевищує значення IVn при $p = 30^\circ$. Під поверхнею знаходиться зона з відносно зниженою мікротвердістю, що пов'язано з виходом на поверхню в процесі пластичного деформування дефектів матеріалу тонкого

поверхневого шару та невеликим відтисненням дрібнодисперсних карбідів вглиб матеріалу [68].

Результати дослідження мікротвердості мітчиків свідчать, що для партії мітчиків українського виробника некоректно виконано термічне оброблення. Крім того, після MAO на зазначених мітчиках розкривалися тріщини матеріалу на робочій частині, що унеможливило їх подальшу експлуатацію.

Результати дослідження поверхневої твердості мітчиків M10×1,5-6H, які обробляли вертикально до площини робочої зони верстату представлено у вигляді гістограми на рис. 4.19.

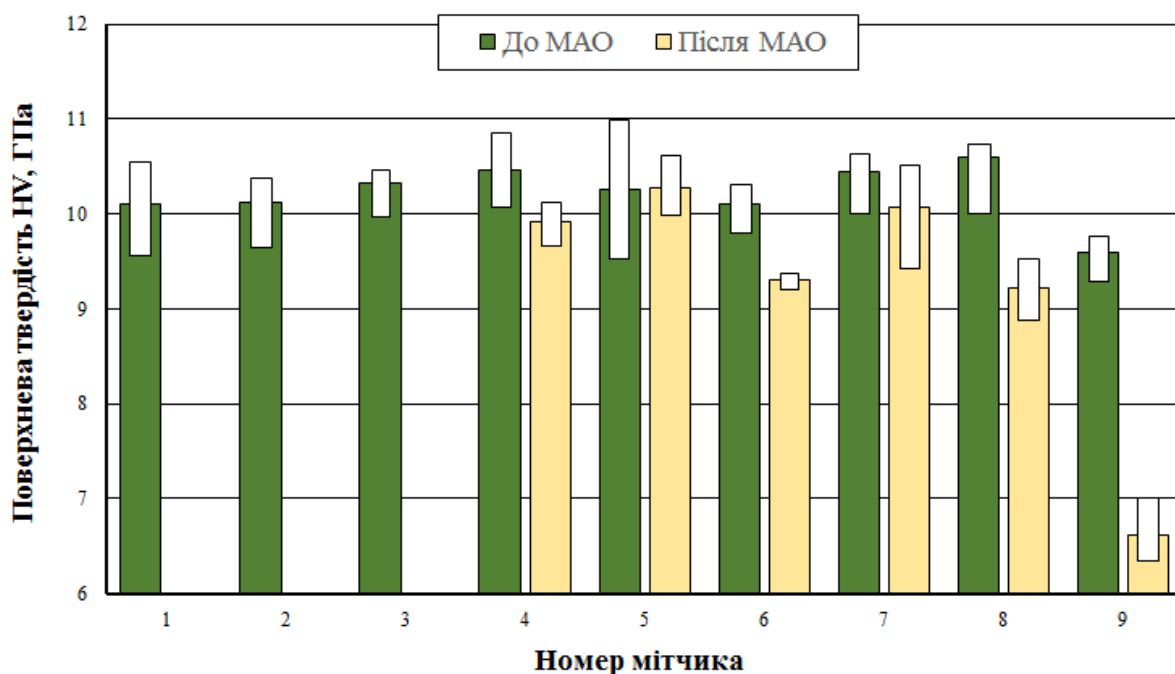


Рис. 4.19. Вплив MAO на поверхневу твердість *HV* робочої частини мітчиків

У всіх мітчиків після MAO з вертикальним розташуванням у робочій зоні поверхнева твердість зменшилася в середньому на 10%. Це можна пояснити особливостям силової взаємодії частинок магнітно-абразивного інструменту з оброблюваними поверхнями інструменту під час MAO, можливістю формування підшарового максимуму по твердості [64]. У мітчика №9, обробленого порошком Полімам-Т 400/315 мкм, поверхнева твердість зменшилась на 34% з $HV = 9,7$ ГПа до $HV = 6,6$ ГПа. Було висунуто припущення, що даний мітчик

виготовлено з порушенням режимів його термічного оброблення. При обробленні мітчиків під кутом до площини робочої зони, поверхнева твердість зростала на 10-15%. Ситуація, що виникла, потребує досліджень структури та твердості матеріалу мітчиків по глибині, а також проведення експлуатаційних досліджень.

Потрібно зауважити, що вимірювання проводили на доступних для цього поверхнях. Так, за результатами розрахунків, при МАО з $p = 30^\circ$ більша частина робочих поверхонь та профілю різальної кромки мітчика знаходяться у зоні «перекривання» і не обробляються ефективно, але провести вимірювання твердості на бічних гранях не було можливості.

4.6. Вплив магнітно-абразивного оброблення на зміну твердості по глибині та структуру матеріалу мітчиків

В усіх мітчиках М10×1,5-6Н після МАО з вертикальним розташуванням деталей у робочій зоні поверхнева твердість зменшилася в середньому на 10%. Результати досліджень поверхневої твердості робочих частин мітчиків після магнітно-абразивного оброблення з вертикальним розташуванням деталі у робочій зоні потребували додаткових досліджень твердості по глибині матеріалу. Для пояснення процесу зміни твердості поверхневого шару необхідно дослідити зміну структури матеріалу після МАО.

Дослідження твердості по глибині проводили на мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженні на індентор 1 Н. Вимірювання проводили на спеціально підготовлених шліфах мітчиків. Шліфування робочої частини мітчиків виконували під кутом 5° до осі інструмента (рис. 4.20). Мікротвердість матеріалу вимірювали від поверхні робочої частини до основи.

Проводячи вимірювання вздовж осі мітчика, неможливо отримати значення твердості по глибині в поверхневих шарах матеріалу з малим кроком, тому що крок між зубцями мітчика 1,5 мм і різниця по глибині між ними може

перевищувати зміцнений в результаті оброблення та працюючий під час нарізання різьби шар. Для можливості результативних вимірювань при такій схемі необхідно виконати шліф під кутом близько 1° , що потребує точності устаткування, базування шліфа та відповідно більшого часу виготовлення.

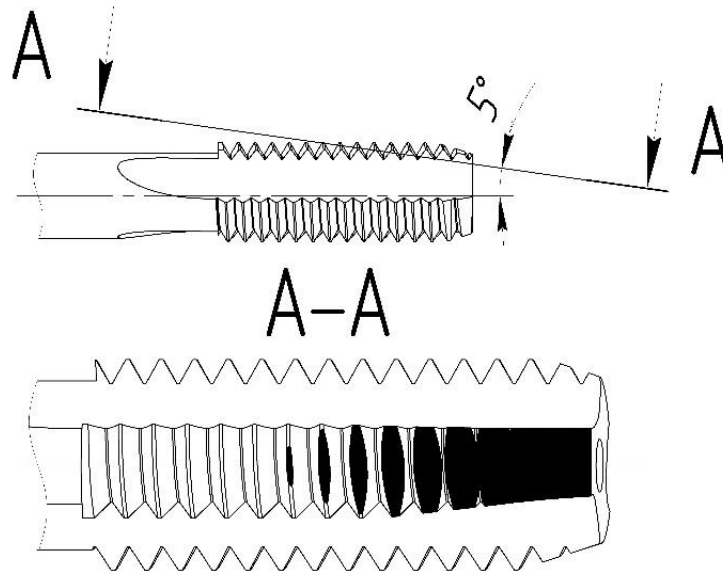


Рис. 4.20. Схема виготовлення шліфа мітчика

Була запропонована схема вимірювання мікротвердості матеріалу мітчика вздовж окремих зубців шліфа (рис. 4.21).

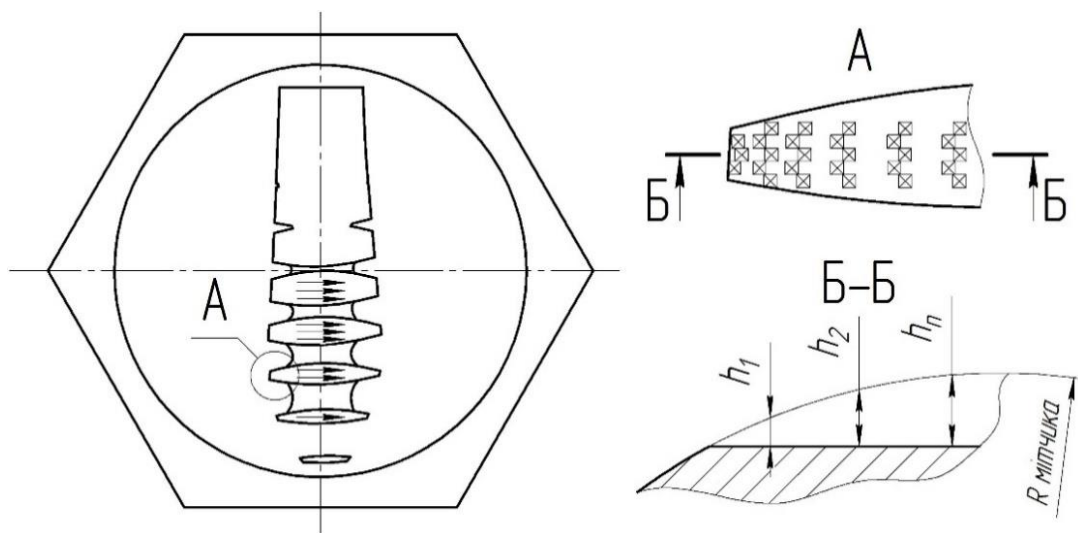


Рис. 4.21. Схема вимірювання мікротвердості: R – зовнішній радіус мітчика;
 h – глибина замірів

Такий метод дозволяє проводити вимірювання твердості від поверхні до основи матеріалу з малим кроком та великою кількістю замірів, що підвищує достовірність результатів. Глибину замірів на кожному окремому зубці визначали геометрично за довжиною зашліфованої ділянки зуба, яка є хордою кола зовнішнього діаметра мітчика. Зовнішній вигляд підготовленого шліфа мітчика та слідів від уколів мікротвердоміра представлено на рис. 4.22.

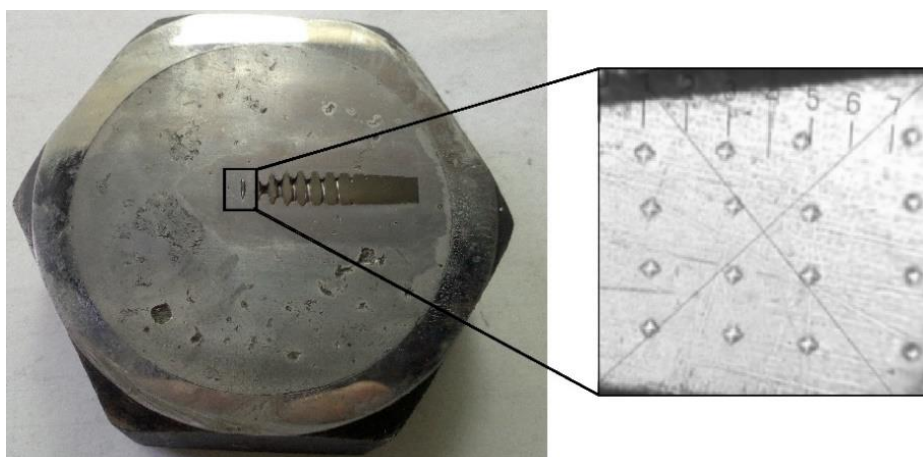


Рис. 4.22. Зовнішній вигляд шліфа для вимірювання твердості по глибині матеріалу мітчика

Результати вимірювань твердості по глибині матеріалу мітчиків представлено на рис. 4.23.

Встановлено, що після оброблення під поверхнею знаходиться зона з відносно зниженою мікротвердістю. Товщина цієї зони складає до 10 мкм в залежності від розміру частинок порошку, яким обробляли мітчик. Це пов'язано з виходом на поверхню в процесі пластичного деформування дефектів матеріалу тонкого поверхневого шару та невеликим відтисненням дрібнодисперсних карбідів вглиб матеріалу [64]. В результаті чого в поверхневому шарі мітчиків після МАО крупним порошком утворюється підшаровий максимум на глибині 8-12 мкм, а після оброблення дрібним - на глибині 2-5 мкм. Наявність підшарового максимуму пов'язано з ударним впливом частинок порошкового інструменту з оброблюваною поверхнею, що сприяє частковим структурним

перетворенням тонкого поверхневого шару. Подібні ефекти спостерігаються під час дії мікро-кульок або частинок абразиву на оброблювану поверхню при струменевих видах оброблення та гідро-абразивному обробленні [59].

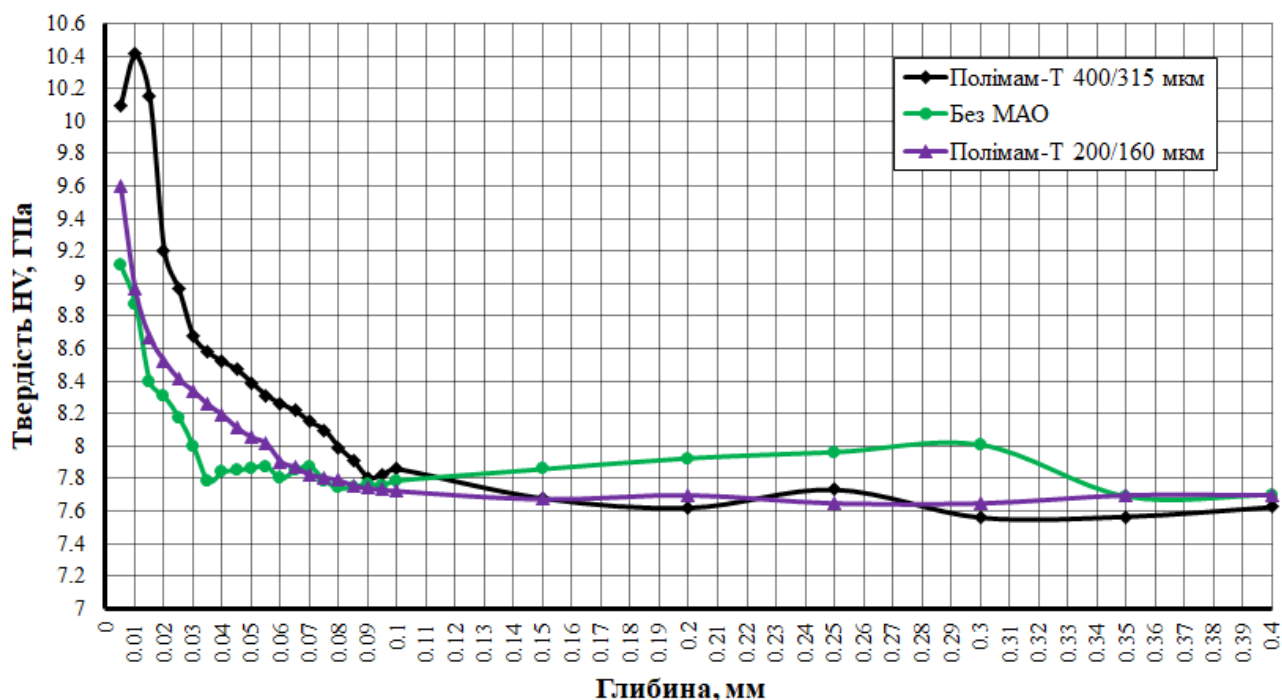
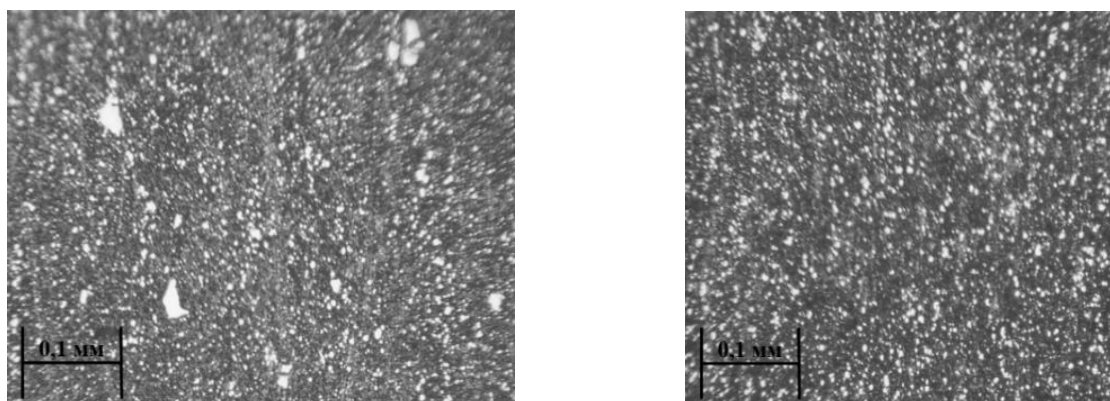


Рис. 4.23. Твердість по глибині матеріалу робочих поверхонь мітчиків

У всіх мітчиках мікротвердість основи становить $HV = 7,6-7,8$ ГПа. Більше значення твердості поверхневого шару пов'язане з наклепом в результаті мікроударів абразивних частинок і пластичної деформації поверхні мітчиків. Це призводить до спотворення ґратки структурних складових, підвищення концентрації дислокацій, подрібнення зерен матеріалу [58]. Глибина зміцненого шару з підвищеною твердістю у мітчиках після МАО, оброблених крупним порошком становить 150 мкм, а після оброблення дрібним порошком – 100 мкм. Досягнення мікротвердості основи в необробленому мітчику спостерігається на глибині 40 мкм від поверхні. Ступінь наклепу поверхневого шару після МАО порошком з розміром частинок 400/315 мкм досягає 37%, а з розміром частинок 200/160 мкм – 26%, в той час як після шліфування за стандартною технологією – 19%. Отримане в результаті МАО зміцнення поверхневого шару мітчиків

гарантовано забезпечить збільшення періоду їх зносостійкості в порівнянні з необробленими [42].

Досліджено мікроструктуру поверхневого шару матеріалу мітчиків після МАО. Підготовлену поверхню шліфа за рекомендаціями [64] було протравлено 5% розчином азотної кислоти в етиловому спирті. Зовнішній вигляд мікроструктури поверхневого шару наведено на рис. 4.24.



До МАО

Після МАО

Рис. 4.24. Структура матеріалу мітчиків на глибині 80-100 мкм

Показано, що після МАО великі карбідні зерна (світлі зерна) подрібнюються під час ударної взаємодії з МАІ, підвищуючи дисперсність, що сприяє формуванню більш однорідної структури сталі, підвищенню твердості, міцності. Додатково, з підвищенням дисперсності карбідів, підвищується теплостійкість сталі, що особливо важливо для металорізального інструменту.

Методом графічного аналізу було визначено розміри карбідів матеріалу робочих частин мітчиків до та після МАО на різній глибині від поверхні. Результати вимірювань представлено в табл. 4.3. та на рис. 4.25.

Встановлено, що величина карбідів в шарі до 150 мкм у мітчиків після МАО на 25-30% менша ніж в необроблених. Дрібні дисперсні карбіди розташовані більш щільно та рівномірно після оброблення крупним порошком Полімам-Т 400/315 мкм, що можна пояснити більшою енергією, яка передається

поверхневому шару матеріалу в процесі ударно-фрикційної взаємодії частинок магнітно-абразивного інструменту з оброблюваною поверхнею.

Таблиця 4.3.

Величина карбідів на різній глибині матеріалу мітчиків

Оброблення мітчика	Глибина вимірювань від поверхні, мкм	Середнє значення розмірів карбідів, мкм	Відхилення Std, мкм
Без МАО	15-25	3,99	0,515
	80-120	7,82	3,14
	>400	8,93	1,26
Полімам-Т 200/160 мкм	15-25	3	0,3
	80-120	5,94	1,55
	>400	8,6	2,02
Полімам-Т 400/315 мкм	15-25	2,67	0,4
	80-120	5,9	1,004
	>400	8,05	2,66

Дія МАО спостерігається і в матеріалі основи. Залишкові напруження, що виникають після МАО [5, 86] та зростання щільності дислокацій в приповерхневому шарі спричиняють подрібнення карбідів матеріалу на значній глибині від поверхні (>400 мкм) та зменшення їх розмірів на 10%.

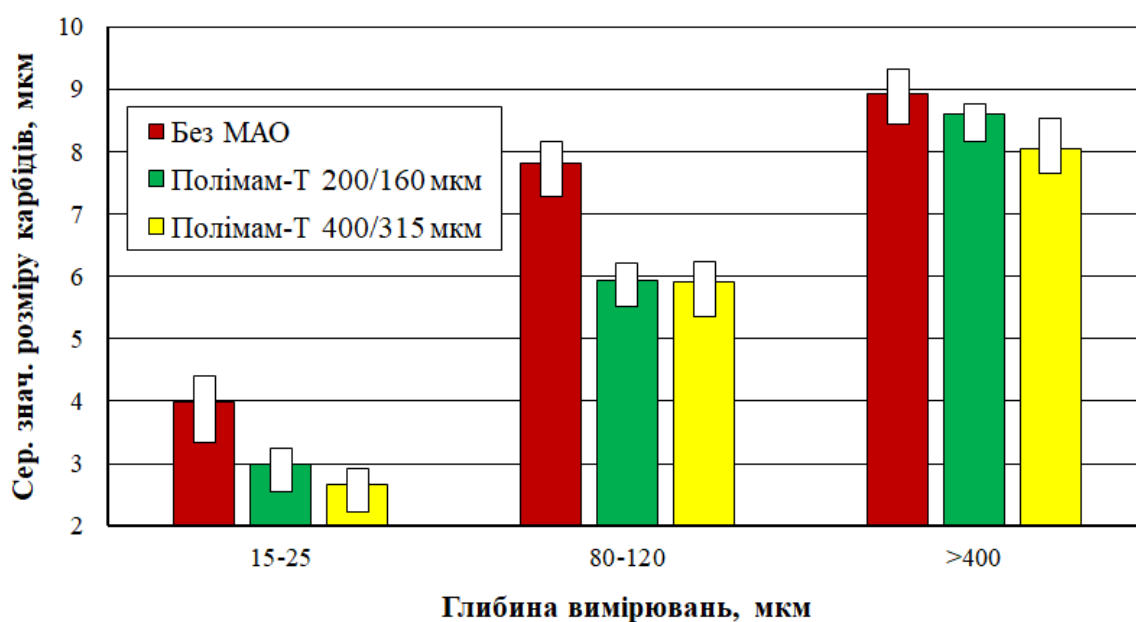


Рис. 4.25. Розміри карбідів по глибині матеріалу мітчиків

Отримані результати не суперечать раніше отриманим даним [64] і розширюють уяву про процеси, які відбуваються в матеріалі при МАО інструменту із швидкорізальної сталі.

4.7. Вплив магнітно-абразивного оброблення на точність мітчиків

Сучасне виробництво з використанням новітніх технологій, систем з числовим програмним керуванням, високою ефективністю та продуктивністю металообробки вимагає надійність, а також високу якість і точність різальних інструментів. Важливо, щоб після фінішних етапів виготовлення інструменту, геометрія і точність робочої частини не змінювались, а набували необхідну форму та характеристики. В іншому випадку на виробництві можливим є велика ймовірність бракування деталей при їх виготовленні, що призведе до суттєвих фінансових втрат.

Одним з перших, хто започаткував дослідження процесу МАО різальних інструментів є Барон Ю.М. В своїй роботі [5] він описав основні параметри процесу, які впливають на точність розмірів та форми оброблюваної поверхні. До них належать фракція та склад магнітно-абразивного порошку, матеріал оброблюваної деталі та форми її поверхонь, величина магнітного поля в робочій зоні та її тип, швидкість руху частинок відносно поверхонь і час оброблення. Так, при поліруванні шліфованих валиків із сталі У8А на установці з малими зазорами в робочій зоні за 30 с середнє значення знятого припуску становило 4 мкм [5]. Автор зазначає, що для деталей складної форми визначити продуктивність МАО, тобто величину зняття матеріалу за одиницю часу, можливо лише експериментальним методом.

В роботах [2, 76] представлені результати дослідження продуктивності процесу МАО як залежність розмірного знімання матеріалу від часу оброблення, при чому останній є ключовим фактором. В [2] проводили дослідження інтенсивності процесу МАО на зовнішньому діаметрі зубчастого колеса.

Встановлено, що основне знімання матеріалу з поверхні колеса відбувається в перші 2-4 хв, коли відбувається активне видалення мікронерівностей. Далі процес знімання матеріалу затухає. За 8 хв активного оброблення, зовнішній діаметр колеса зменшився на 40 мкм.

Виконані дослідження впливу MAO на зміну розмірів свердл із швидкорізальної сталі по довжині робочої частини [5, 86] показали, що зменшення діаметру свердла від часу оброблення становить 10-7 мм/с і майже ідентичне по всій довжині інструмента. Встановлено, що зміна діаметру після 10 хв оброблення в різних перерізах вздовж осі не перевищує 10 мкм.

Питання впливу MAO на точність мітчиків частково розглянуто в роботах [5, 30, 75]. Але результати їх досліджень ґрунтуються на масовій частці знятого матеріалу та більше направлені на досягнення конкретних характеристик робочих поверхонь. Результати цих досліджень не дають можливість оцінити вплив процесу на геометричну точність робочої частини мітчика та обрати час оброблення, що забезпечить зберігання роботоздатності інструменту.

Дослідження проводили на мітчиках із швидкорізальної сталі Р6М5 трьох різних виробників (рис. 4.26): М12×1,75-6Н, М10×1-6Н та М6×0,75-6Н.



Рис. 4.26. Зовнішній вигляд досліджуваних мітчиків

MAO мітчиків проводили з використанням магнітно-абразивного порошку Полімам-Т. Режими оброблення мітчиків М12: швидкість руху вздовж кільцевої ванни верстату – $V_B = 2,5$ м/с, частота обертання навколо власної осі – $\omega_O = 700$ об/хв., величина магнітної індукції в робочій зоні складала $B = 0,3$ Тл,

кут $p = 70^\circ$. Результати вимірювання зовнішнього діаметру представлено в табл. 4.4.

Після 3-6 хв МАО зовнішній діаметр мітчиків зменшився в середньому на 20 мкм, після 7,5 хв – на 25-30 мкм. Важливо, що діаметр майже не змінився між 3 та 6 хв оброблення. Це можна пояснити тим, що в перші хвилини процесу відбувається інтенсивне видалення завусенок та округлення гострих кромek на вершинах зубців. Також за цей час видаляється дефектний шар матеріалу, що сформувався на етапі шліфування, знімаються концентратори напружень та відбувається подрібнення карбідів та зміцнення поверхні інструменту [68]. Після 6 хв оброблення, в результаті ударної взаємодії квазістабільних об'ємів магнітно-абразивного інструменту з поверхнею мітчика, внутрішні напруження та щільність дислокацій на границі досягає критичного значення і відбувається відшарування тонкого шару матеріалу з поверхні [40, 41], що призводить до збільшення радіусів округлення різальних кромek та зменшення діаметру інструменту. Дані процеси циклічно повторюються через певний проміжок часу [23, 59], тобто має місце процес, який аналогічний каскадному зношуванню при терті.

Таблиця 4.4.

Результати вимірювання зовнішнього діаметру мітчиків М12

№	Клас точності мітчика	Загальний час оброблення, хв	Зовнішній діаметр d , мм				
			ГОСТ 16925-93	До МАО	Після МАО	Δd , мм	МАП
1	6Н	3	$12_{+0,064}$	12,151	12,129	0,022	Полімам-Т 400/315 мкм
2		4,5		12,150	12,130	0,020	
3		6		12,137	12,128	0,009	
4		7,5		12,153	12,121	0,032	
5		7,5		12,144	12,120	0,024	Полімам-Т 630/400 мкм

Режими оброблення мітчиків М10 аналогічні як і для мітчиків М12 за виключенням зернистості магнітно-абразивного порошку. Результати вимірювання зовнішнього діаметру представлено в табл. 4.5.

Таблиця 4.5.

Результати вимірювання зовнішнього діаметру мітчиків М10

№	Клас точності мітчика	Загальний час оброблення, хв	Зовнішній діаметр d , мм				
			ГОСТ 16925-93	До МАО	Після МАО	Δd , мм	МАП
1	6Н	3	$10_{+0,050}$	10,124	10,097	0,027	Полімам-Т 200/100 мкм
2		4,5		10,096	10,096	0	
3		6		10,111	10,094	0,017	
4		7		10,147	10,126	0,021	
5		7,5		10,125	10,097	0,028	

Після МАО мітчиків М10 порошком Полімам-Т 200/100 мкм отримали аналогічні результати як для мітчиків М12. Різке зменшення діаметру на 20 мкм відбувається на перших 2-3 хв процесу і залишається незмінним до 7 хв. Для М10 цикл зміцнення поверхневого шару займає більше часу, тому що площа контакту частинок порошку фракції 200/100 мкм з оброблюваною поверхнею менша ніж при використанні фракції 400/315 мкм [40, 70]. Подальше збільшення часу оброблення призводить до знімання більшого припуску та зменшення діаметру за наступну хвилину до 25-30 мкм.

Режими оброблення мітчиків М6: швидкість руху вздовж кільцевої ванни верстату – $V_B = 2,5$ м/с, частота обертання навколо власної осі $\omega_O = 500$ об/хв., величина магнітної індукції в робочій зоні складала $B = 0,25$ Тл, кут $p = 70^\circ$. Результати вимірювання зовнішнього діаметру представлено в табл. 4.6.

Для мітчиків М6, які обробляли відповідно до розмірів з іншими режимами, результати вимірювання діаметру мають таку ж тенденцію як попередні. За перші 3 хв процесу діаметр зменшився на 15 мкм та не змінювався до 5 хв оброблення.

Таблиця 4.6.

Результати вимірювання зовнішнього діаметру мітчиків М6

№	Клас точності мітчика	Загальний час оброблення, хв	Зовнішній діаметр d , мм				
			ГОСТ 16925-93	До МАО	Після МАО	Δd , мм	МАП
1	6Н	1,5	$6_{+0,047}$	6,097	6,097	0,000	Полімам-Т 200/100 мкм
2		2,5		6,094	6,090	0,004	
3		3		6,088	6,074	0,014	
4		4		6,092	6,076	0,016	
5		4,5		6,091	6,090	0,001	

4.8. Висновки

Проведено експериментальні дослідження по візуалізації інтенсивності оброблення поверхонь мітчиків. Показано, що при $p = 30^\circ$ активне оброблення відбувається лише на циліндричній частині зубців та на забірному конусі. Більша частина профілю різальної кромки залишається необробленою, що свідчить про наявність зон «перекривання» та недостатньої взаємодії порошку з поверхнею деталі. Натомість, при обробленні з кутом $p = 70^\circ$ зони «перекривання» майже відсутні.

Досліджено вплив МАО в умовах великих робочих зазорів кільцевого типу на покращення мікрогеометрії робочих поверхонь, формування радіусів округлення РК, формування необхідних фізико-механічних характеристик робочих поверхонь, що доводить його ефективність та доцільність використання для підвищення роботоздатності мітчиків із швидкорізальної сталі. Експериментально підтверджено аналітичні розрахунки залежності формування параметрів якості від співвідношення нормальної та тангенціальної складових інтегральної інтенсивності оброблення.

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що:

1. Оптимальний кут нахилу мітчиків до площини робочої зони верстату

при МАО є $p = 70-80^\circ$. При такому розташуванні забезпечується достатня інтенсивність оброблення всіх робочих поверхонь за тангенціальною та нормальною складовими, зменшується шорсткість та підвищується поверхнева твердість інструменту.

2. Встановлено, що найкращий результат чистоти робочих поверхонь отримано магнітно-абразивним порошком Полімам-Т, який без сумніву є основним магнітно-абразивним матеріалом для МАО різального інструменту із швидкорізальної сталі. Шорсткість на задній поверхні зменшилася з $Ra = 0,57$ мкм до $Ra = 0,4$ мкм, а на передній поверхні з $Ra = 0,13$ мкм до $Ra = 0,1$ мкм. МАО порошком Полімам-М 400/315 мкм призводить до збільшення шорсткості на задній поверхні з $Ra = 0,57$ мкм до $Ra = 0,82$ мкм, на передній поверхні шорсткість не змінилася. При обробленні порошком Царамам 630/400 мкм шорсткість на задній та передній поверхнях майже не змінилася.

Для зменшення шорсткості на передній поверхні ефективно проводити оброблення з мінімально допустимим кутом нахилу мітчиків до площини робочої зони $p = 60-70^\circ$. При таких кутах процесу, шорсткість на передній поверхні досліджуваних мітчиків зменшили до $Ra = 0,1-0,2$ мкм, на задній – до $Ra = 0,5-0,6$ мкм. Для максимального зменшення шорсткості на задніх поверхнях слід проводити МАО при вертикальному розташуванні мітчиків до площини робочої зони верстату. В такому випадку шорсткість на задній поверхні зменшується до $Ra = 0,1-0,2$ мкм, на передній – до $Ra = 0,2-0,4$ мкм. В усіх випадках шорсткість поверхонь буде також залежати від часу оброблення та зернистості порошку. Доведена можливість контрольованої та прогнозованої зміни величини шорсткості робочих поверхонь мітчиків із швидкорізальної сталі в процесі МАО.

3. Встановлено, що МАО мітчиків при $p = 60-70^\circ$ сприяє збільшенню радіусів округлення різальних кромek до 20-35 мкм, в результаті чого повинен збільшитись період стійкості мітчиків. На формування величини радіусів

округлення різальних кромок суттєвий вплив має саме тангенціальна складова інтенсивності оброблення, тому після МАО з кутами $p = 80-90^\circ$ радіуси округлення кромок інструменту майже не змінюються.

4. При МАО з ефективними кутами нахилу мітчиків до площини робочої зони верстату $p = 60-90^\circ$ можливе зменшення поверхневої твердості мітчиків до 10%, що пов'язано з видаленням дефектного шару матеріалу та утворенням підшарового максимуму.

5. Встановлено, що після МАО під поверхнею знаходиться зона з відносно зниженою мікротвердістю, що пов'язано з виходом на поверхню в процесі пластичного деформування дефектів матеріалу тонкого поверхневого шару та невеликим відтисненням дрібнодисперсних карбідів вглиб матеріалу. В поверхневому шарі мітчиків після МАО крупним порошком утворюється підшаровий максимум на глибині 8-12 мкм, а після оброблення дрібним - на глибині 2-5 мкм. Наявність підшарового максимуму пов'язано з ударно-фрикційним впливом частинок порошкового інструменту з оброблюваною поверхнею. Ступінь наклепу поверхневого шару після МАО порошком з розміром частинок 400/315 мкм досягає 37%, а з розміром частинок 200/160 мкм – 26%, в той час як після шліфування за стандартною технологією – 19%.

6. Після МАО карбідні зерна подрібнюються за рахунок ударно-фрикційної взаємодії з МАІ і формуванню в поверхневих шарах стискаючих залишкових напружень, підвищуючи дисперсність, що сприяє формуванню більш однорідної структури сталі, підвищенню твердості, зносостійкості. Величина карбідів в шарі до 150 мкм у мітчиків після МАО на 25-30% менша ніж в необроблених. Дрібні дисперсні карбіди розташовані щільніше та рівномірніше після оброблення крупним порошком Полімам-Т 400/315 мкм, що можна пояснити більшою енергією, яка передається поверхневому шару матеріалу в процесі ударно-фрикційної взаємодії частинок магнітно-абразивного інструменту з оброблюваною поверхнею. Залишкові напруження та зростання

щільності дислокацій в приповерхневому шарі спричинюють подрібнення карбідів матеріалу на значній глибині від поверхні основи та зменшення їх розмірів на 10%.

7. Доказано, що МАО мітчиків при правильно підібраній тривалості процесу не призводить до критичної зміни діаметрів, що в процесі експлуатації може призвести до бракування деталей. Встановлено, що різке зменшення діаметру відбувається в перші 3-6 хв оброблення. Причиною цього є видалення завусенок з вершин зубців та дефектів шліфування, а також заокруглення різальних кромek інструменту. Для мітчиків М12 та М10 за перші 3-6 хв МАО зовнішній діаметр в середньому зменшився на 20 мкм, для мітчиків М6 – на 15 мкм. Зменшення діаметру при МАО мітчиків циклічно повторюється, що можна пояснити циклічною зміною фізико-механічних властивостей тонких поверхневих шарів матеріалу інструменту та їх періодичним видаленням.

РОЗДІЛ 5

ВПЛИВ МАО НА РОБОТОЗДАТНІСТЬ МІТЧИКІВ

5.1. Вплив МАО мітчиків на силові характеристики процесу нарізання різьби

Крутний момент при нарізанні різьби демонструє як шорсткість поверхонь та радіуси округлення різальних кромek впливають на сили різання. Розрахунок силових характеристик процесу різьбонарізання та завантаження різальної частини мітчика дозволять визначити його напружено-деформований стан і оцінити можливість поломки досліджуваного мітчика під дією сил опору матеріалу заготовки. Чим більший момент та його перепади, тим більша вірогідність поломки та заклинювання мітчика.

Дослідження силових характеристики при експлуатації мітчиків проводили на вертикально – свердлильному верстаті з застосуванням універсального динамометра УДМ–600, котрий приєднано через узгоджувальний пристрій до ЕОМ. Визначали максимальне значення крутних моментів при нарізанні наскрізної різьби в плиті із сталі 12ХН3 (217 НВ). Для нарізання різьби використовували мітчики М12×1,75-6Н, характеристики яких досліджували у попередніх розділах. Інформація про режими оброблення мітчиків, їх вихідні параметри, максимальне значення крутного моменту та максимальне значення його перепадів при нарізанні різьби представлено в табл. 5.1, а графіки зміни крутного моменту від часу нарізання різьби наведені на рис. 5.1.

Показано, що в усіх мітчиках, оброблених МАО моменти при нарізанні різьби значно менші ніж у необроблених. Для мітчиків, які обробляли при $p = 45^\circ$ моменти менші на 30-35%, при $p = 65^\circ$ – на 40%. Також у оброблених мітчиків порівняно з необробленим на кривій залежності відсутній пік врізання. Поява піку врізання у необроблених мітчиків та виникнення великих моментів

пояснюється тим, що вони мають досить велику (порівняно з обробленими МАО) шорсткість, задирки та завусенки на РК, які перешкоджають вільному врізанню інструмента в заготовку, мітчик закручується і відповідно момент збільшується. В цей час існує велика ймовірність руйнування та сколів зубців через різке зростання сил різання.

Таблиця 5.1.

Вихідні параметри та значення крутних моментів досліджуваних мітчиків

Режими оброблення	Шорсткість поверхонь Ra, мкм		Поверхнева твердість HV, ГПа	Радіус округлення РК, мкм	Mmax, Н·м	ΔM_{max} Н·м
	Передня	Задня				
Без МАО	1,3	1,2	8,2	27	27,19	10,44
Поліам-Т 200/160 мкм, $p = 45^\circ$	0,1	0,7	9,2	32	18,13	7,27
Поліам-Т 200/160 мкм, $p = 65^\circ$	0,1	0,9	9,1	29	16,02	5,06

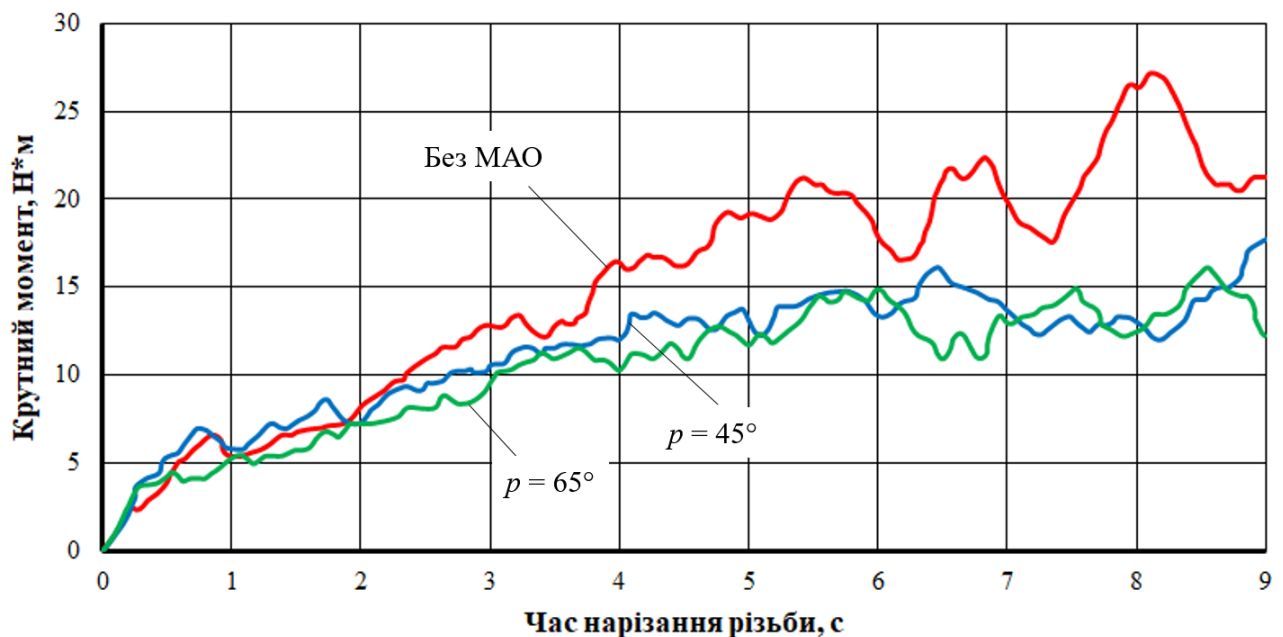


Рис. 5.1. Залежність зміни крутного моменту від часу нарізання різьби

Після невеликого проміжку часу відбувається „припрацювання” мітчика, під час якого інструмент підходить до своїх оптимальних робочих характеристик, при цьому сили протидії стають менші і мітчик дещо “відпускається” (розкручується), а момент зменшується.

Доведено, що МАО мітчиків в результаті позитивного комплексного впливу на мікрогеометрію, радіуси округлення різальних кромок, структуру та твердість матеріалу робочої частини інструменту приводить до зменшення крутного моменту при нарізанні різьби. Процес різьбонарізання відбувається при менших зусиллях, без суттєвих сплесків навантажень, що є передумовою підвищення стійкості інструменту.

5.2. Вплив процесу МАО на стійкість мітчиків при експлуатації

Робота мітчиків, в силу специфіки різьбонарізання, протікає в дуже важких умовах: в процесі одночасно беруть участь багато різальних кромок, значна площа контакту інструменту з оброблюваним матеріалом, як в зоні різання, так і на бічних поверхнях, важкодоступність введення МОТС в зону різання, надмірні силова і температурні навантаження. Все це призводить до інтенсивного зносу, а також викликає заклинювання різальних зубців в отворі, що призводить до руйнування мітчиків.

В попередніх розділах доведено, що МАО мітчиків в великих магнітних робочих зонах кільцевого типу забезпечує покращення як мікрогеометрії робочих поверхонь та РК так і фізико-механічних властивостей матеріалу робочої частини інструменту, що гарантує зменшення сил та моментів при нарізанні різьби, краще відведення стружки із зони різання та зміцнення робочої частини інструменту. Ефективність МАО та отримання необхідних характеристик в значній мірі визначається умовами, часом оброблення та базуванням мітчиків в робочій зоні верстату.



Дослідження стійкості та зносу мітчиків проводили на двох партія мітчиків

M10×1,5-6H. Характеристики мітчиків та режими їх МАО представлені у табл. 5.2.

За критерій стійкості було прийнято зношення по задній поверхні на рівні 0,3 мм [28]. Саме така величина зношення достатня для забезпечення точності нарізаної різьби. Досліджено кінетику процесу зношення по задній поверхні різальної частини мітчиків від кількості нарізаних отворів. Точність нарізаної різі контролювали калібром-пробкою.

Таблиця 5.2.

Характеристики та режими МАО мітчиків

Досліджувані мітчики	К-сть, шт	Особливості МАО	Ra, мкм		HV, ГПа	ρ, мкм
			Передня	Задня		
 М10×1,5-6Н з підточуванням	3	Без МАО	0,13	0,58	9	8
	3	Поліам-Т 400/315 мкм $p = 60^\circ$	0,1	0,4	9,9	20
	3	Поліам-М 400/315 мкм $p = 60^\circ$	0,13	0,82	10	-
	3	ПР Р6М5 200/160 мкм після Царамам 630/400 мкм $p = 60^\circ$	0,11	0,72	9,7	12
 М10×1,5-6Н	3	Без МАО	0,62	1,2	9,8	-
	3	Поліам-Т 400/315 мкм $p = 30^\circ$	0,3	0,8	10,5	-
	3	Поліам-Т 400/315 мкм $p = 70^\circ$	0,35	0,9	10	-

Вимірювання зносу проводили на кожному пері мітчиків на різних зубцях забірної та калібрувальної частини.

Найбільший знос по задній поверхні зафіксовано на 2 та 3 зубцях (рис. 5.2-5.3), тому що саме вони сприймають найбільше навантаження в процесі нарізання різьби [7, 20, 53, 79]. У цій зоні спостерігали як абразивне так і адгезійне зношення.

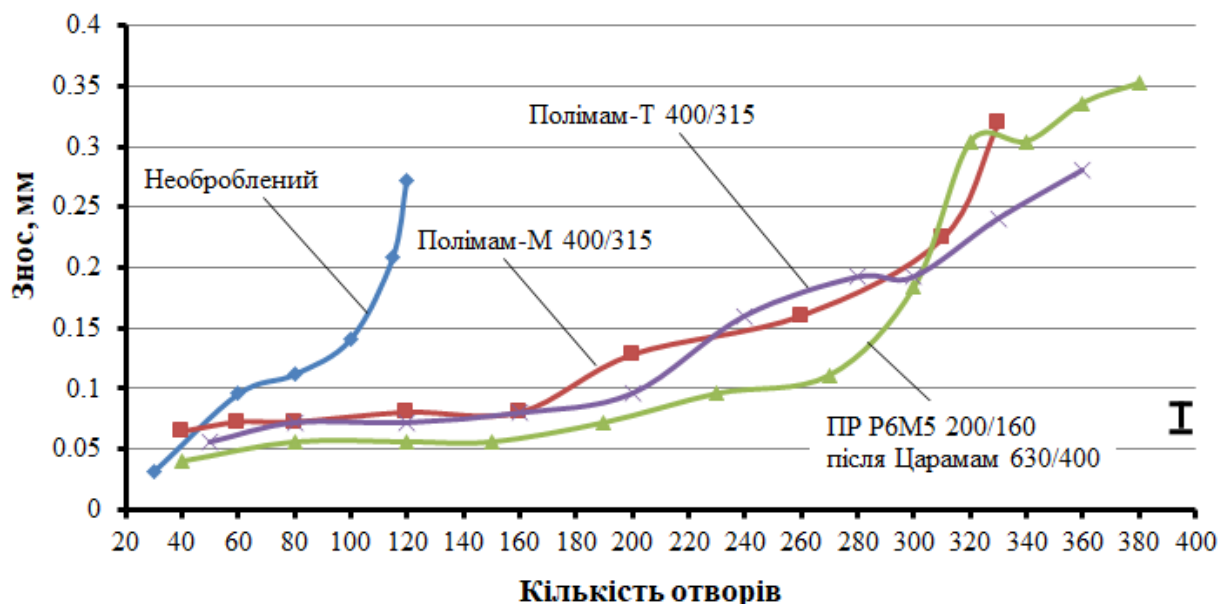


Рис. 5.2. Знос 2 зубця по задній поверхні

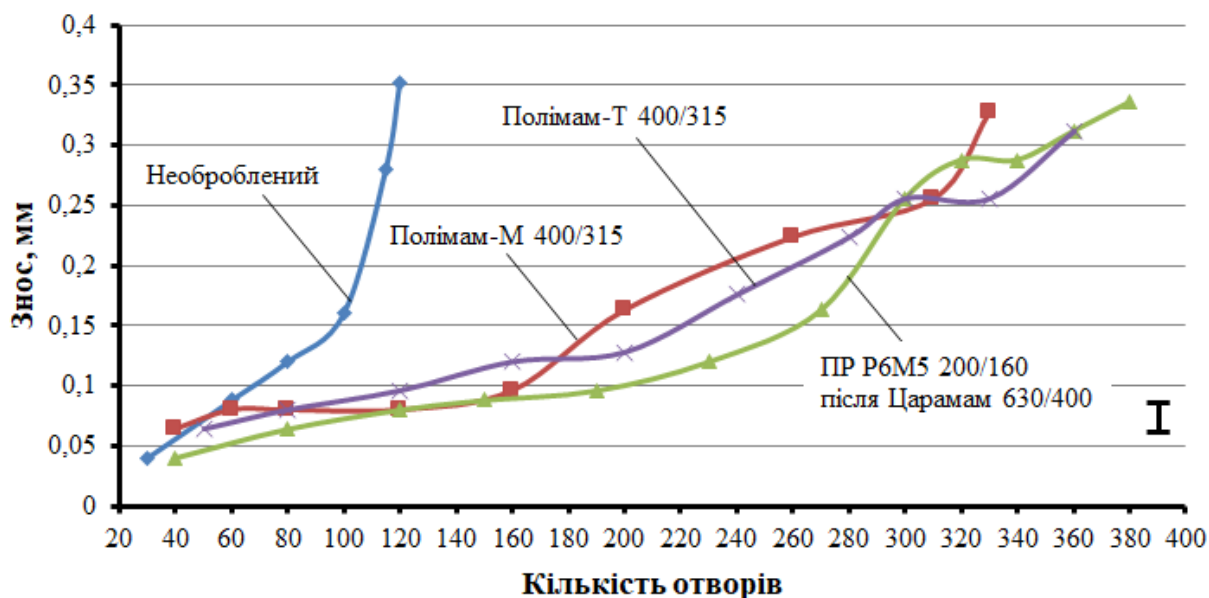


Рис. 5.3. Знос 3 зубця по задній поверхні

На 5 та 6 зубцях, які відносяться до калібрувальної частини мітчика, характер зносу виключно абразивний і максимальне його значення ледь

досягало 0,2 мм. Графіки зношення 4 та 5 зубців мітчиків придставлено на рис. 5.4-5.5.

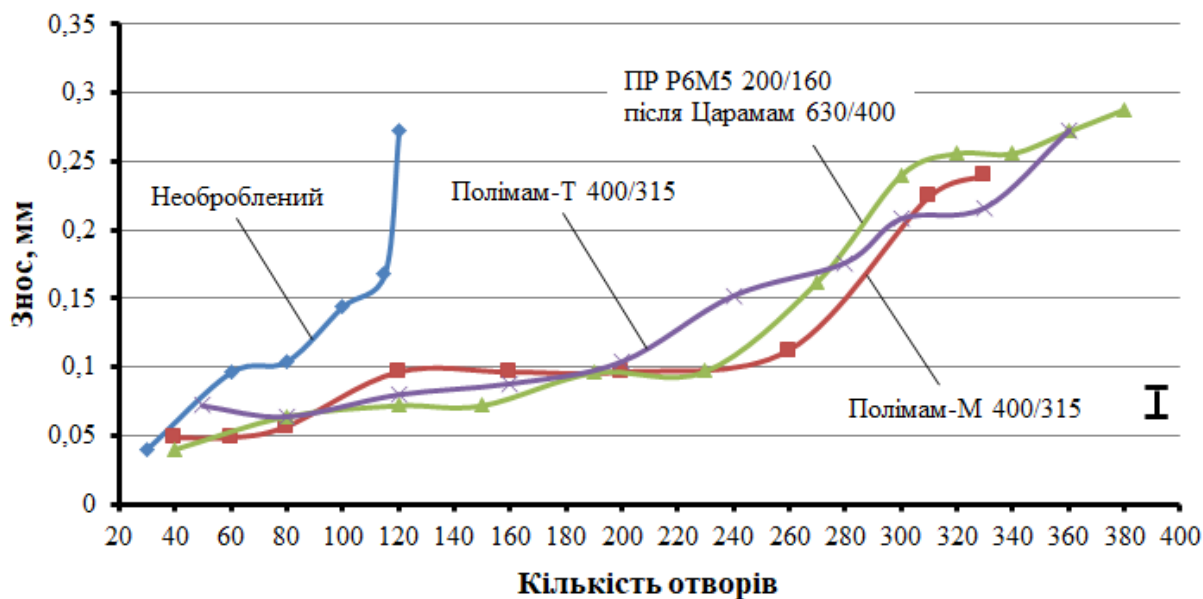


Рис. 5.4. Знос 4 зубця по задній поверхні

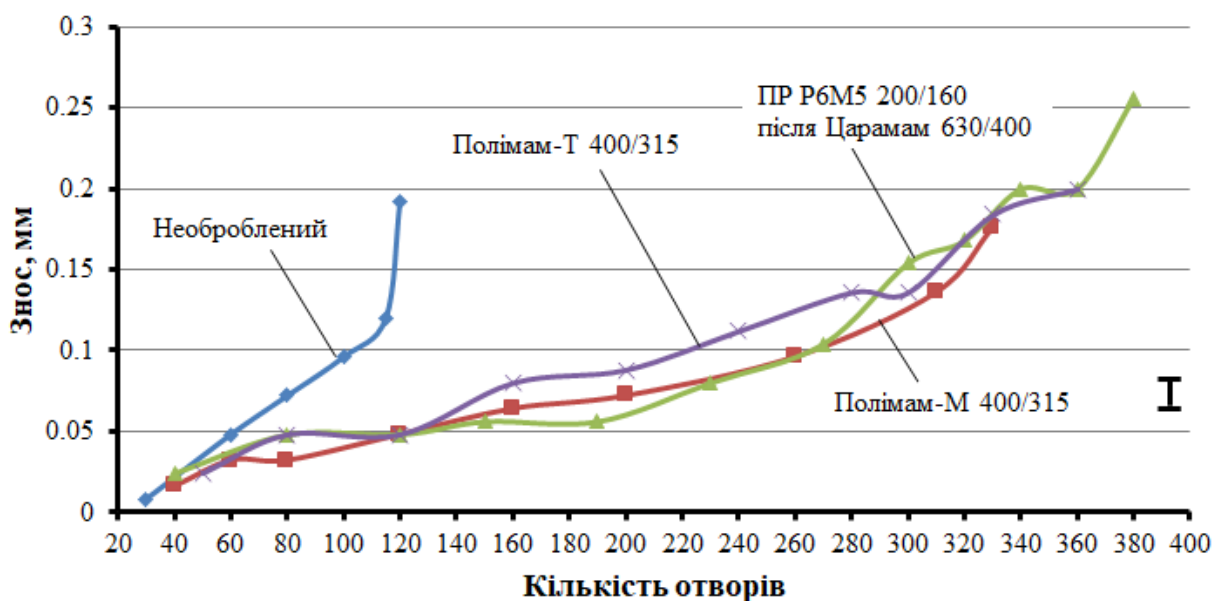
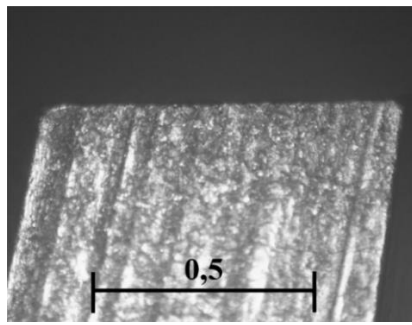
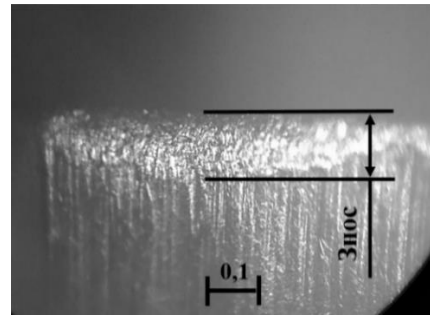


Рис. 5.5. Знос 5 зубця по задній поверхні

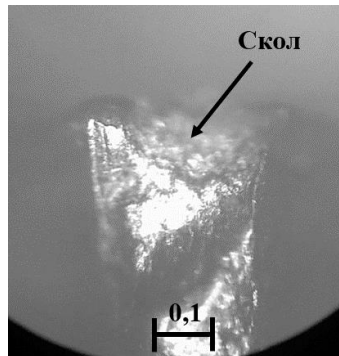
Зі збільшенням часу роботи в мітчиках наявне руйнування окремих зубців та викришування кромки, що в процесі подальшої експлуатації призводить до руйнування інструменту (рис. 5.6). Зведені графіки стійкості мітчиків першої представлено на рис. 5.7.



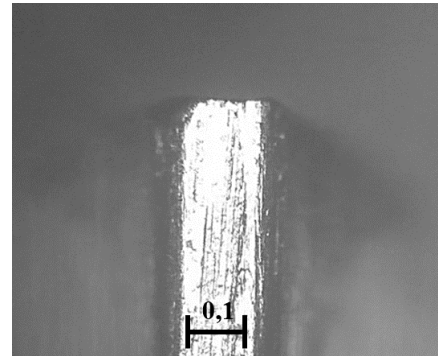
3 зубець нового мітчика



Знос 3 зубця



Скол на 4 зубці



Знос 6 зубця

Рис. 5.6. Зовнішній вигляд зубців до та після експлуатації мітчиків

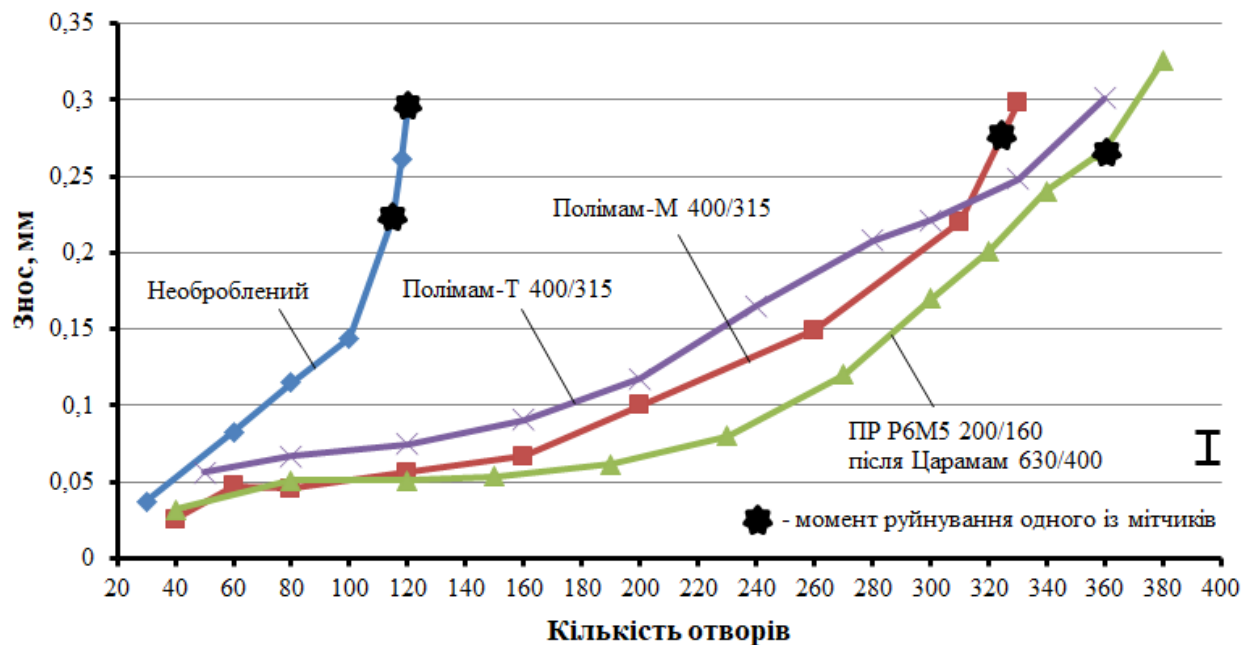


Рис. 5.7. Зношення мітчиків першої партії М10×1,5-6Н

Встановлено, що стійкість мітчиків після додаткової фінішної операції MAO збільшується в 2,5-3 рази. При цьому найкращі результати отримано при

МАО з використанням магнітно-абразивного порошку Полімам-Т з оскольчатою формою частинок.

Результати досліджень стійкості другої партії мітчиків, які обробляли з різними кутами нахилу до площини робочої зони верстату представлено на рис. 5.8. Показано, що МАО мітчиків другої партії призвело до збільшення стійкості у 2 рази. Кращий результат показали мітчики, які обробляли при $p = 70^\circ$, оскільки в процесі МАО майже відсутні зони «перекривання» і всі поверхні піддаються комплексному впливу методу. Кількість зруйнованих мітчиків, які обробляли при $p = 30^\circ$ така ж як і для необроблених, 2 із 3, але період їх стійкості все рівно збільшено в 1,5 разів.

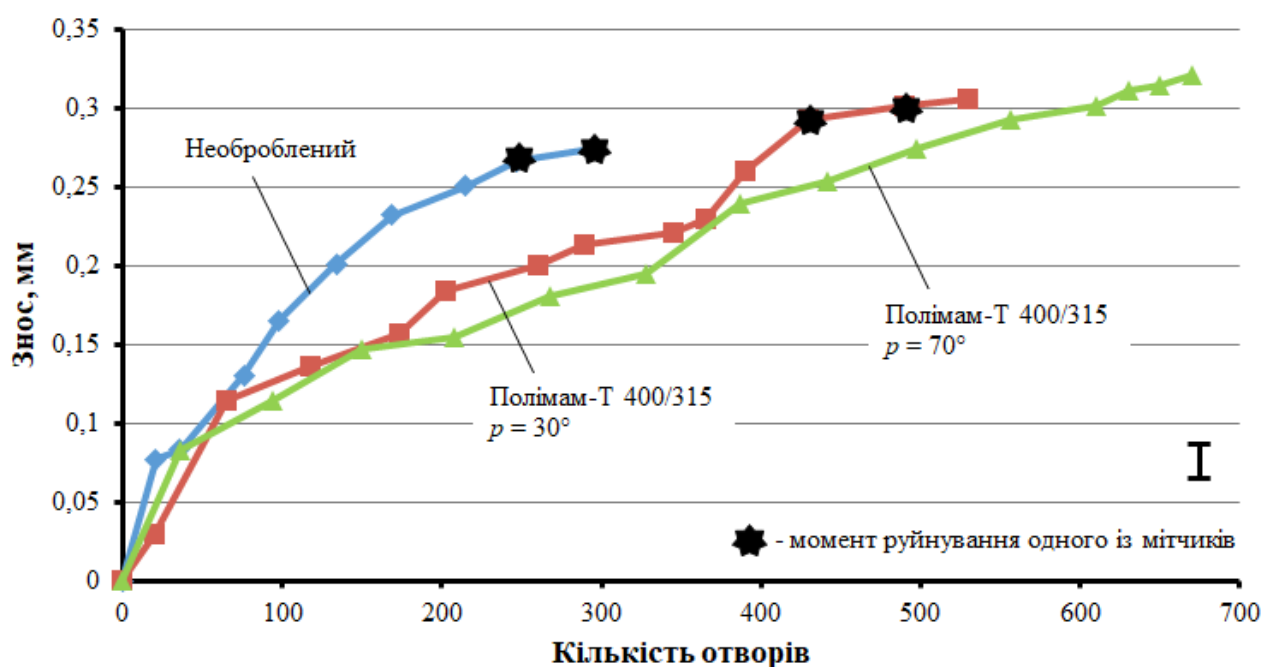


Рис. 5.8. Зношення мітчиків другої партії М10×1,5-6Н

Результати експериментальних досліджень повністю підтверджують аналітичні розрахунки та теоретичні припущення, які представлено в попередніх розділах. Стійкість мітчиків після МАО зросла в 2-3 рази, при цьому граничне значення зносу для них становить 0,3-0,34 мм, в той час як для необроблених – 0,25-0,3 мм. Позитивний результат досягається перш за все за рахунок переважного зміцнення поверхневого шару, зниження шорсткості робочих

поверхонь при незначному збільшенні радіусів округлення різальних кромek зубців мітчиків.

При нарізанні різьби мітчиками часто зустрічається поломка інструменту. Причинами цього можуть бути: заклинювання стружки; великий знос, що приводить до підвищення сил різання; недостатнє підведення МОТС; малий діаметр отвору під різьбу; висока швидкість різання та ін. Руйнування мітчиків в процесі нарізання різьби є серйозною проблемою, тому що потребує багато часу на вилучення інструменту із отвору, а дуже часто приводить до бракування деталей.

МАО мітчиків забезпечує підвищення їх міцності та як наслідок зменшує вірогідність їх руйнування за рахунок покращення якості поверхонь та фізико-механічних властивостей матеріалу робочої частини. Доведено, що МАО мітчиків із швидкорізальної сталі сприяє зменшенню сил різання та підвищенню стійкості інструменту. В результаті цього гарантовано має зменшитись відсоток поломки мітчиків, що пов'язаний з технологічними параметрами нарізання різьби та не залежить від людських факторів.

Проведено статистичний аналіз результатів лабораторних досліджень та промислового використання мітчиків із швидкорізальної сталі підприємств-партнерів для визначення відсоткового співвідношення поломок мітчиків. Для аналізу враховували мітчики, якими нарізали різьбу в лабораторії (М12×1,75 – 4 шт, М10×1,5 з підточуванням – 12 шт, М10×1,5 – 9шт) та партію мітчиків М10×1,5 з гвинтовими канавками (12 шт), якими працювали на підприємстві в умовах реального виробництва. Всього проаналізовано роботу 37 мітчиків, з яких 13 необроблених та 24 оброблених методом МАО. Результати відсоткового співвідношення зруйнованих мітчиків до цілих представлено у вигляді гістограм на рис. 5.9.

Кількість повного руйнування мітчиків, які піддавалися додатковій МАО більш ніж у 2 рази менша, що забезпечує зменшення витрат на інструмент, часу

на видалення зруйнованих мітчиків та бракування деталей, що значно підвищує продуктивність виробництва. Мітчики після зношення можна переточити, провести МАО та повторно використовувати. Такі результати аналізу цілком достовірно демонструють комплексний вплив МАО на підвищення якості мітчиків із швидкорізальної сталі.

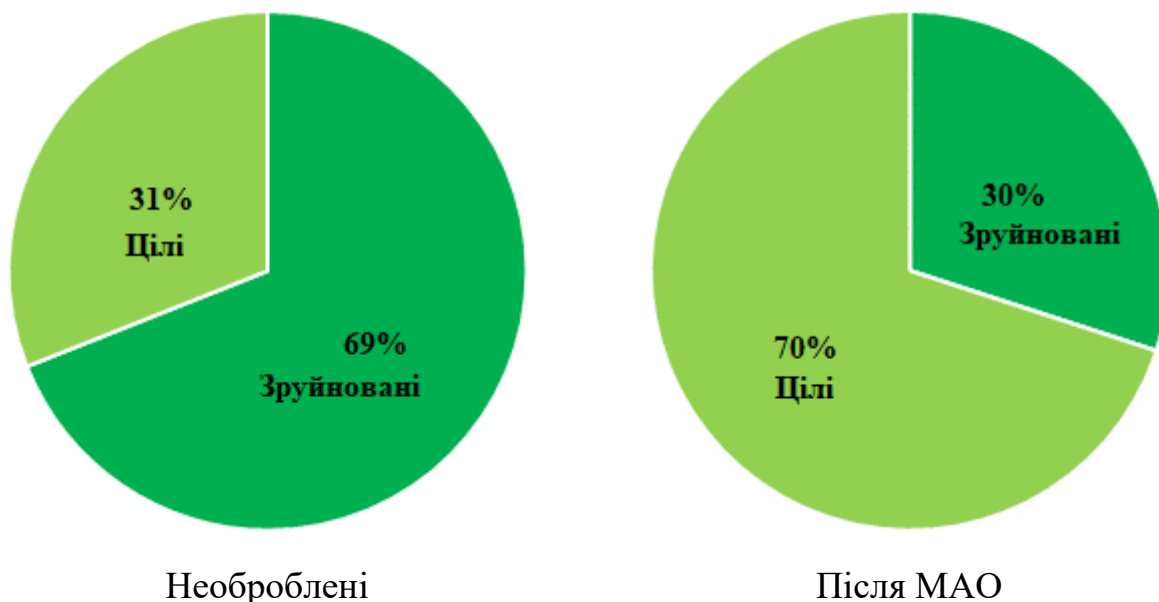


Рис. 5.9. Статистика руйнування мітчиків

Отримані результати дають змогу рекомендувати використання МАО для підвищення стійкості мітчиків із швидкорізальної сталі.

5.3. Висновки

В результаті досліджень впливу МАО на роботоздатність мітчиків із швидкорізальної сталі встановлено, що:

1. МАО мітчиків в результаті позитивного комплексного впливу на мікрогеометрію, радіуси округлення різальних кромek, структуру та твердість матеріалу робочої частини інструменту приводить до зменшення крутного моменту при нарізанні різьби у 2 рази, з $M_{max} = 27 \text{ Н}\cdot\text{м}$ до $M_{max} = 16 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Після МАО у мітчиків відсутнє різке збільшення сил при врізанні інструмента, що

суттєво впливає на підвищення стійкості як окремих зубців так і всієї робочої частини;

2. Проведені дослідження впливу методу МАО мітчиків на їх стійкість показали, що даний метод фінішного оброблення при раціональних умовах забезпечує підвищення стійкості в 2 – 3 рази. Найбільший знос по задній поверхні зафіксовано на 2 та 3 зубцях, тому що вони сприймають найбільше навантаження в процесі нарізання різьби. Найкращі результати отримано при МАО з використанням магнітно-абразивного порошку Полімам-Т з осколькою формою частинок та при $p = 70^\circ$, оскільки при такому розташуванні майже відсутні зони «перекривання» і всі поверхні піддаються комплексному впливу методу;

3. Фінішний метод МАО забезпечує зменшення вірогідності повного руйнування мітчиків при експлуатації більш ніж у 2 рази в порівнянні з необробленими, що забезпечує зниження фінансових витрат на інструмент, бракування деталей та підвищення продуктивності виробництва.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі встановлено умови комплексного підвищення якості мітчиків із швидкорізальної сталі при магнітно-абразивному обробленні на верстатах з кільцевим розташуванням робочої зони за рахунок формування радіусів округлення різальних кромek, мікрогеометрії робочих поверхонь та їх фізико-механічних властивостей, що забезпечує високу стійкість та роботоздатність інструменту.

1. Розроблено метод розрахунку кількісної оцінки дій квазістабільних об'ємів МАІ на робочі поверхні мітчиків під час магнітно-абразивного оброблення. Визначено особливості процесу МАО мітчиків в умовах робочих зазорів кільцевого типу в залежності від особливостей їх базування в зоні оброблення. Встановлено, що за результатами розрахунків можна виконувати прогнозування вірогідного впливу базування мітчиків в робочій зоні на якість оброблення їх робочих поверхонь. Визначено, що IV_n та IV_t збільшуються рівномірно при збільшенні кутових швидкостей для всіх варіантів базування мітчиків в робочій зоні верстату. Показано, що при $p = 20-60^\circ$ обробляються лише точки, близькі до вершин, на вершинах зубців та на забірному конусі, $IV_n = 200-350 \text{ м}^2/\text{с}$, $IV_t = 500-650 \text{ м}^2/\text{с}$. Тобто, МАО мітчиків при $p = 20-60^\circ$ є недоцільним, тому що частина поверхонь знаходиться в зоні «перекривання» де відсутній активний процес взаємодії з МАІ. Ефективне МАО мітчиків доцільно виконувати за умов їх розташування під кутом $p = 60-90^\circ$ до площини робочої зони. При $p = 60^\circ$ на бічних гранях $IV_n = 150-400 \text{ м}^2/\text{с}$, $IV_t = 100-500 \text{ м}^2/\text{с}$. На вершинах зубців та на забірному конусі $IV_n = 600, 750 \text{ м}^2/\text{с}$ та $IV_t = 850, 800 \text{ м}^2/\text{с}$ відповідно. При $p = 70^\circ$ на бічних гранях $IV_n = 350-400 \text{ м}^2/\text{с}$, $IV_t = 300-850 \text{ м}^2/\text{с}$, на вершинах зубців та на забірному конусі $IV_n = 700, 750 \text{ м}^2/\text{с}$ та $IV_t = 800 \text{ м}^2/\text{с}$ відповідно. При $p = 80^\circ$ та $p = 90^\circ$ значення стають однаковими для всього профілю з мінімальною різницею, так для бічних граней $IV_n = 400 \text{ м}^2/\text{с}$,

$IV_t = 1050 \text{ м}^2/\text{с}$, на вершинах зубців та на забірному конусі $IV_n = 700 \text{ м}^2/\text{с}$ та $IV_t = 750\text{-}800 \text{ м}^2/\text{с}$.

2. Встановлено, що найкращий результат чистоти робочих поверхонь отримано магнітно-абразивним порошком Полімам-Т. Шорсткість на задній поверхні зменшилася з $Ra = 0,57 \text{ мкм}$ до $Ra = 0,4 \text{ мкм}$, а на передній поверхні з $Ra = 0,13 \text{ мкм}$ до $Ra = 0,1 \text{ мкм}$. МАО порошком Полімам-М 400/315 мкм не призводить до зміни шорсткості як на задній так і на передній поверхнях. При обробленні порошком Царамам 630/400 мкм шорсткість на задній та передній поверхнях також майже не змінилася.

Для зменшення шорсткості на передній поверхні ефективно проводити оброблення з мінімально допустимим кутом нахилу мітчиків до площини робочої зони $p = 60\text{-}70^\circ$. При таких кутах процесу, шорсткість на передній поверхні досліджуваних мітчиків зменшили до $Ra = 0,1\text{-}0,2 \text{ мкм}$, на задній – до $Ra = 0,5\text{-}0,6 \text{ мкм}$. Для максимального зменшення шорсткості на задніх поверхнях слід проводити МАО при вертикальному розташуванні мітчиків до площини робочої зони верстату. В такому випадку шорсткість на задній поверхні зменшується до $Ra = 0,1\text{-}0,2 \text{ мкм}$, на передній – до $Ra = 0,2\text{-}0,4 \text{ мкм}$. Доведена можливість контрольованої та прогнозованої зміни величини шорсткості робочих поверхонь мітчиків із швидкорізальної сталі в процесі МАО.

3. Встановлено, що МАО мітчиків при $p = 60\text{-}70^\circ$ сприяє збільшенню радіусів округлення різальних кромок до 20-35 мкм, в результаті чого збільшується період стійкості мітчиків. На формування величини радіусів округлення різальних кромок суттєвий вплив має саме тангенціальна складова інтенсивності оброблення, тому після МАО з кутами $p = 80\text{-}90^\circ$, радіуси округлення кромок інструменту майже не змінюються.

4. При МАО з ефективними кутами нахилу мітчиків до площини робочої зони верстату $p = 60\text{-}90^\circ$ можливе зменшення поверхневої твердості

мітчиків до 10%, що пов'язано з видаленням дефектного шару матеріалу та утворенням підшарового максимуму.

Встановлено, що після МАО під поверхнею знаходиться зона з відносно зниженою мікротвердістю, що пов'язано з виходом на поверхню в процесі пластичного деформування дефектів матеріалу тонкого поверхневого шару та невеликим відтисненням дрібнодисперсних карбідів вглиб матеріалу. В поверхневому шарі мітчиків після МАО крупним порошком утворюється підшаровий максимум на глибині 8-12 мкм, а після оброблення дрібним - на глибині 2-5 мкм. Наявність підшарового максимуму пов'язано з ударно-фрикційним впливом частинок порошкового інструменту з оброблюваною поверхнею. Ступінь наклепу поверхневого шару після МАО порошком з розміром частинок 400/315 мкм досягає 37%, а з розміром частинок 200/160 мкм – 26%, в той час як після шліфування за стандартною технологією – 19%.

Після МАО великі карбідні зерна подрібнюються під час ударної взаємодії з МАІ, підвищуючи дисперсність, що сприяє формуванню більш однорідної структури сталі, підвищенню твердості, зносостійкості. Величина карбідів в шарі до 150 мкм у мітчиків після МАО на 25-30% менша ніж в необроблених. Дрібні дисперсні карбіди розташовані щільніше та рівномірніше після оброблення крупним порошком Полімам-Т 400/315 мкм, що можна пояснити більшою енергією, яка передається поверхневому шару матеріалу в процесі ударно-фрикційної взаємодії частинок магнітно-абразивного інструменту з оброблюваною поверхнею. Залишкові напруження та зростання щільності дислокацій в приповерхневому шарі спричиняють подрібнення карбідів матеріалу на значній глибині від поверхні основи та зменшення їх розмірів на 10%.

5. Доказано, що МАО мітчиків, при правильно підібраній тривалості процесу, не призводить до критичної зміни діаметрів, що в процесі експлуатації може призвести до бракування деталей. Встановлено, що різке зменшення

діаметру відбувається в перші 3-6 хв оброблення. Причиною цього є видалення завусенок з вершин зубців та дефектів шліфування, а також заокруглення різальних кромek інструменту. Для мітчиків M12 та M10 за перші 3-6 хв МАО зовнішній діаметр в середньому зменшився на 20 мкм, для мітчиків M6 – на 15 мкм. Зменшення діаметру при МАО мітчиків циклічно повторюється, що можна пояснити циклічною зміною фізико-механічних властивостей тонких поверхневих шарів матеріалу інструменту та їх періодичним видаленням.

6. МАО мітчиків в результаті позитивного комплексного впливу на мікрогеометрію, радіуси округлення різальних кромek, структуру та твердість матеріалу робочої частини інструменту приводить до зменшення крутного моменту при нарізанні різьби у 2 рази, з $M_{max} = 27$ Н·м до $M_{max} = 16$ Н·м. Після МАО у мітчиків відсутнє різке збільшення сил при врзанні інструменту, що суттєво впливає на підвищення стійкості як окремих зубців так і всієї робочої частини.

Проведені дослідження впливу методу МАО мітчиків на їх стійкість показали, що даний метод фінішного оброблення при раціональних умовах забезпечує підвищення стійкості в 2 – 3 рази. Найбільший знос по задній поверхні зафіксовано на 2 та 3 зубцях, тому що вони сприймають найбільше навантаження в процесі нарізання різьби. Найкращі результати отримано при МАО з використанням магнітно-абразивного порошку Полімам-Т з осколькою формою частинок та при $p = 70^\circ$, оскільки при такому розташуванні майже відсутні зони «перекривання» і всі поверхні піддаються комплексному впливу методу.

Фінішний метод МАО забезпечує зменшення вірогідності повного руйнування мітчиків при експлуатації більш ніж у 2 рази в порівнянні з необробленими, що забезпечує зниження фінансових витрат на інструмент, бракування деталей та підвищення продуктивності виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Акулович, Л.М., Сергеев Л.Е. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей различного профиля. Минск : БГАТУ, 2013. 372 с.
2. Акулович Л.М., Сергеев Л.Е., Лебедев В.Я. Основы магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей. Минск : БГАТУ, 2012. 316 с.
3. Бабичев А.П. Вибрационная обработка деталей. Москва : Машиностроение, 1974. 136 с.
4. Барон, Ю.М. Влияние состояния кромок лезвий на эффективность режущих инструментов. *Инструмент и технологии*. 1997. №5. С 1-11.
5. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. Ленинград : Машиностроение, 1986. 176 с.
6. Барон Ю.М. Технология магнитно-абразивной обработки. Ленинград : Машиностроение, 1975. 128 с.
7. Блинов Р.М. Исследование причин заклинивания метчика в процессе нарезания резьбы в глухих отверстиях. *СТИН*. 2005. №6. С.8-14.
8. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. Москва : Машиностроение, 1993. 336 с.
9. Влияние струйно-абразивной и магнитно-абразивной обработок на состояние рабочих поверхностей и режущих кромок сверл из быстрорежущей стали / А.А. Беляев, Б. Карпушевский, Л.Г. Дюбнер, В.С. Майборода. *Вестник двигателестроения*. 2007. № 2. С. 90 – 94.
10. Вплив кінематики процесу магнітно-абразивного оброблення на параметри якості робочих поверхонь мітчиків із швидкорізальної сталі / Д.В. Тарган, В.С. Майборода, О.А. Плівак, Г.Г. Добровольський. *Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки*. 2018. №81. С. 48-53.
11. Вплив магнітно-абразивного оброблення на твердість поверхневого шару свердел із швидкорізальної сталі / І.В. Ткачук, В.С. Майборода,

Н.В. Мініцька, Д.Ю. Джулій, О.О. Беляєв. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*. 2012. №31. С. 271-279.

12. Вплив магнітно-абразивного оброблення на якість мітчиків із швидкорізальної сталі / В.С. Майборода, І.В. Ткачук, Д.Ю. Джулій, Д.В. Тарган. *Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2013. №772. С. 202-207.

13. Вплив магнітно-абразивного оброблення на якість шпонкових фрез із швидкорізальної сталі / В.С. Майборода, І.В. Слободянюк, Д.Ю. Джулій, Д.В. Тарган. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Технології в машинобудуванні: зб. наук. пр.* 2018. №6(1282). С. 55-59.

14. Гейчук В.М. Синтез кінематики процесу магнітно-абразивної обробки в кільцевій ванні : дис. ... доктора техн. наук : 05.03.01. Київ, 2012. 472с.

15. ГОСТ 16093-2004. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Допуски. Посадки с зазором. Взамен ГОСТ 16093-81. [введен 2005-07-01]. Москва : Стандартинформ. 45с.

16. ГОСТ 24705-2004. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Основные размеры. Взамен ГОСТ 24705-81. [введен 2005-07-01]. Москва : Стандартинформ. 16с.

17. ГОСТ 3266-81. Метчики машинные и ручные. Конструкция и размеры. Взамен ГОСТ 3266-71. [введен 1982-07-01]. Москва : Издательство стандартов. 72с.

18. ГОСТ 8724-2002. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Диаметры и шаги. Взамен ГОСТ 8724-81. [введен 2004-01-01]. Москва : Стандартинформ. 9с.

19. ГОСТ 9150-2002. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Профиль. Взамен ГОСТ 9150-81. [введен 2004-01-01]. Москва : Стандартинформ. 4с.

20. Грудов А.А. Влияние скорости резания и износа метчиков на крутящий момент. *СТИН*. 1963. №1. С.13.

21. Грудов А.А., Комаров П.И. Высокопроизводительный резьбообразующий инструмент. Москва : НИИМАШ, 1980. 64с.
22. Грудов А.А. Пути увеличения точности нарезаемой резьбы и стойкости метчиков. Москва : МСИП, ВНИИ, 1966. 128с.
23. Джулій Д.Ю. Підвищення якості багатограних непереточуваних твердосплавних пластин при магнітно-абразивному обробленні в кільцевій ванні : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01. Київ, 2014. 175 с.
24. Древаль А.Е., Литвиненко А.В. Критерии оптимального износа машинных метчиков. *Известия ВУЗов. Серия «Машиностроение»*. 2012. № 1. С. 60-66.
25. Дюбнер Л.Г., Майборода В.С., Ивановский А.А. Магнитно-абразивная обработка концевое режущего инструмента. *Вестник Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Машиностроение*. 2003. №44 С. 107-108.
26. Зверовщиков В.З. Точностные характеристики центробежно-абразивной обработки деталей незакрепленным шлифовальным материалом. *Новые промышленные технологии*. 1997. №3. С. 22 – 29.
27. Івановський О.А. Формування магніто-абразивного інструменту для оброблення свердел в умовах великих магнітних щілин : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01. Київ, 2009. 135 с.
28. Интегрированные процессы обработки материалов резанием: учебник / А.И. Грабченко, В.А. Залого, Ю.Н. Внуков и др.; под общ. ред. А.И. Грабченко и В.А. Залого. Сумы : Университетская книга, 2017. 451 с.
29. Каиров А.С., Лимарь А.А., Анастасенко С.Н. Повышение стойкостных характеристик режущего инструмента путем применения смазочно-охлаждающих технологических сред. *Вестник НТУУ «КПИ». Серия машиностроения*. 2014. №70. С. 88-93.
30. Кексин А.И. Повышение качества внутренних резьбовых поверхностей на основе предварительного магнитно-абразивного полирования

сложнопрофильного инструмента : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08. Санкт-Петербург, 2017. 200 с.

31. Киреев Г.И. Проектирование метчиков и круглых плашек: учебное пособие. Ульяновск : УлГТУ, 2008. 107 с.

32. Ковришкін М.О., Шевченко О.В., Довжук С.О. Методи формування зносостійких покриттів на різальному інструменті. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2010. № 23. С. 62-69.

33. Кутепов С.Н., Калинин А.А., Гвоздев А.Е. Современные стали для быстрорежущей обработки металлических сплавов. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2018. №10. С. 597-607.

34. Магнітно-абразивна обробка осьового і кінцевого різального інструменту. Дослідження впливу умов базування деталей на зміну геометричних характеристик різальних кромek свердел при магнітно абразивній обробці / В.С. Майборода, Д.В. Хроновский, В.І. Солодкий, Н.В. Ульяненко. *Наукові вісті НТУУ "КПІ"*. 2002. №5. С. 69-73.

35. Магнітно-абразивне оброблення свердел, виготовлених з швидкорізальної сталі / В.С. Майборода, І.В. Ткачук, Н.В. Мініцька, Д.Ю. Джулій, О.О. Беляєв. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*. 2012. №31. С. 271-279.

36. Майборода В.С. Вплив магнітно-абразивного оброблення на якість мітчиків із швидкорізальної сталі / В.С. Майборода, І.В. Ткачук, Д.Ю. Джулій, Д.В. Тарган. *Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2013. №772. С. 202-207.

37. Майборода В.С. Вплив магнітно-абразивного оброблення на якість шпонкових фрез із швидкорізальної сталі / В.С. Майборода, І.В. Слободянюк, Д.Ю. Джулій, Д.В. Тарган. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Технології в машинобудуванні. 2018. №6(1282). С. 55-59.

38. Майборода В.С. Дослідження властивостей магнітно-абразивного інструменту сформованого з сумішей порошків. *Процеси механічної обробки в машинобудуванні*. 2009. №. 6. С. 144-159.

39. Майборода В.С., Ивановский О.А. Дослідження впливу в'язкості змащувально-охолоджуючого технологічного середовища на властивості магнітно-абразивного інструменту. *Вестник национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт"*. *Машиностроение*. 2004. №45. С. 99-102.

40. Майборода В.С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь : дис. ... докт. техн. наук : 05.03.01. Київ, 2001. 404 с.

41. Майборода В.С., Слободянюк И.В., Джулий Д.Ю. Магнитно-абразивная обработка деталей сложной формы. Житомир : ПП "Рута", 2017. 272 с.

42. Майборода В.С., Тарган Д.В. Вплив магнітно-абразивного оброблення на мікрогеометрію та експлуатаційні показники мітчиків зі швидкорізальної сталі. *Процеси механічної обробки в машинобудуванні*. 2015. №15. С. 59-65.

43. Майборода В.С., Тарган Д.В., Мусіюк О.Б. Магнітно-абразивне оброблення мітчиків із швидкорізальної сталі на верстаті з кільцевим розташуванням робочої зони. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*. 2017. №40. С. 105-114.

44. Майборода В.С., Ткачук И.В., Джулий Д.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки. Конспект лекций по курсу «Основы механики разрушения». Киев, 2015. 56 с.

45. Мальков О.В. Анализ способов обработки резьбы фрезерованием. *Машиностроение и компьютерные технологии*. 2016. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sposobov-obrabotki-rezby-frezerovaniem> (дата звернення: 12.02.2020).

46. Матвеев В.В. Надежность резьбонарезных операций. *Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты в технологии машиностроения*. 1984. №15. С. 3–5.
47. Матвеев В.В. Нарезание точных резьб. Москва : Машиностроение, 1968. 116 с.
48. Матвеев В.В. Нарезание точных резьб. Москва : Машиностроение, 1978. 88с.
49. Матвеев В.В. Повешение работоспособности машинных метчиков при нарезании точных резьб на агрегатных станках. *Организация процессов обработки металлов резанием* : сб. науч. труд. Москва, 1961. №28. С. 15.
50. Матюха П. Г., Бурдин А.В. Современные тенденции развития магнитно-абразивной обработки. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство*. 2009. №6. С. 166-173.
51. Никифоров А.Д. Точность и технология изготовления метрических резьб. Москва : Высшая школа, 1963. 91 с.
52. Нечай Е.В., Пичугин Н.И. Анализ финишных методов обработки деталей в среде свободных абразивов. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2010. № 2. С. 152-166.
53. Новиков П.А. Выявление причин приводящих к поломке инструмента при обработке внутренних резьб малого диаметра. *Вестник СевНТУ*. 2010. №107. С. 165-169.
54. Новиков П.А. Особенности работы метчика при нарезании резьбы малого диаметра. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць*. 2010. №26. С. 68-74.
55. Новиков П.А. Повышение точности формообразования внутренних резьб М3...М6 в деталях из алюминиевых сплавов : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01. Севастополь, 2012. 210 с.
56. Олиker В.Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий. Москва : Металлургия, 1990. 176 с.

57. Олиker В.Е. Применение, классификация и тенденции развития абразивной обработки ферромагнитными порошками. Киев : ИПМ АН УССР. 1984. 66с.
58. Основи механіки руйнування: навч. посіб. / В.С. Майборода, М.М. Бобіна, Т.В. Лоскутова, Н.В. Мініцька. Київ: НТУУ “КПІ”, 2010. 124 с.
59. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. Киев : Техника, 1989. 177 с.
60. Родин П.Р. Металлорежущие инструменты: учеб. для вузов. Киев : Вища школа, 1979. 432с.
61. Сакулевич Ф.Ю., Минин Л.К., Олендер Л.А. Магнитно-абразивная обработка точных деталей. Минск : Высшэйшая школа, 1977. 288 с.
62. Солоненко В.Г., Двадненко И.В. Повышение работоспособности режущих инструментов поверхностным пластическим деформированием. *СТИН*. 2001. №4. С. 17 – 21.
63. Степанов О.В. Исследование процесса формирования магнитно-абразивного порошкового инструмента для обработки деталей сложной геометрической формы : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.06. Киев, 1997. 145 с.
64. Структура та властивості поверхневого шару інструменту з сталі Р6М5 після магнітно-абразивної обробки /М.М. Бобіна, В.С.Майборода, Н.В.Ульяненко, А.Б.Бобін. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2002. № 4. С. 577-580.
65. Тамаркин М А., Тищенко Э.Э., Друпов В.В. Формирование параметров качества поверхности при центробежно-ротационной обработке в среде абразива. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2007. №10. С. 19-23.
66. Тарган Д.В. Аналіз інтенсивності магнітно-абразивного оброблення мітчиків в залежності від кінематичних параметрів процесу / Д.В. Тарган, В.С. Майборода, Д.Ю. Джулій. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Сучасні технології в машинобудуванні, транспорті та гірництві*. 2017. №106. С. 82-88.
67. Тарган Д.В. Вплив кінематики процесу магнітно-абразивного оброблення на параметри якості робочих поверхонь мітчиків із швидкорізальної

сталі / Д.В. Тарган, В.С. Майборода, О.А. Плівак, Г.Г. Добровольський . *Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки*. 2018. №81. С. 48-53.

68. Тарган Д.В., Майборода В.С. Вплив магнітно-абразивного оброблення на твердість та структуру матеріалу мітчиків із швидкорізальної сталі. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2017. №61. С. 119-125.

69. Ткачук І.В., Майборода В.С. Геометричні характеристики магнітно-абразивних порошків. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*. 2014. № 34. С. 49–55.

70. Ткачук І.В. Формування магнітно-абразивного інструменту зі стабільними властивостями в робочих зазорах кільцевого типу : дис. ... канд. тех. наук : 05.03.01. Київ, 2015. 164с.

71. Ульяненко Н.В. Підвищення працездатності твердосплавного інструменту шляхом застосування магнітно-абразивного оброблення та нанесення зносостійких покриттів : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01. Київ, 2006. 160 с.

72. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С.А. Клименко и др.; под общ. ред. С.А. Чижика и М.Л. Хейфеца. Минск : Беларуская навука, 2017. 376 с.

73. Фомичев Д.С. Повышение эффективности процесса сверления и нарезания внутренней резьбы метчиками путем использования пластичных СОТС с трибоактивными присадками : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.03.01, 05.02.04. Иваново, 2006. 20с.

74. Харламов Ю.А. Инженерия поверхности и развитие современного машиностроения. *Тяжелое машиностроение*. 2001. № 2. С. 2-7.

75. Хоменко В.А., Иконников А.М., Богданов А.В. Магнитно-абразивная обработка метчиков. *Ползуновский весник*. 2012. № 1/1. С. 318-320.

76. Хомич Н.С. Магнитно-абразивная обработка изделий. Минск : БНТУ, 2006. 218с.

77. Шагун В.И. Влияние геометрических и конструктивных параметров машинных метчиков на размеры резьбы, нарезаемой в стали. *Резьбообразующий инструмент*. 1968. №19. С.151-158.
78. Шагун В.И. Исследование точности внутренних резьб, нарезаемых машинными метчиками : автореф. дис. канд. тех. наук : 05.03.01. Минск, 1964. 21с.
79. Шагун В.И. Точность резьбы и эксплуатация метчиков. *Промышленность Белоруссии*. 1965. №4. С. 12-16.
80. Якухин В.Г. Высокотехнологические методы металлообработки: учебник. Москва : МГИУ, 2011. 362 с.
81. Якухин, В.Г. Оптимальная технология изготовления резьб. Москва : Машиностроение, 1985. 184 с.
82. Alessandra O.C., Lincoln C.B., Túlio H. P. Analysis of form threads using fluteless taps in cast magnesium alloy (AM60), *Journal of Materials Processing Technology*. 2012. Vol. 212, P. 1753-1760.
83. Baron Y.M. Finishing, improvement of wearing and hardening using magnetic field. Saint-Petersburg : Create Space Independent Publishing Platform, 2008. 328 p.
84. Bassett E., Köhler J., Denkena B. On the honed cutting edge and its side effects during orthogonal turning operations of AISI1045 with coated WC-Co inserts. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2012. Vol. 5. P. 108 – 126.
85. Benga G., Ciupitu I., Stanimir A. Correlation between cutting forces and tool wear when thread tapping AISI P20 hardened steel. *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*. 2009. P. 1753-1754.
86. Byelyayev O. Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung : Phd-Thesis: Magdeburg, 2008. P. 150.
87. Cutting edge preparation by means of abrasive brushing / B. Denkena, L. de Leon, E. Bassett, M. Rehe. *Key Engineering Materials. The Coatings in Manufacturing Engineering*. 2010. Vol. 438. P. 1 – 7.

88. Cutting edge preparation using magnetic polishing and its influence on the performance of high-speed steel drills. / F.Y. Cheung, Z.F. Zhou, A. Geddam, K.Y. Li. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 208. P. 196-204.
89. Denkena B., Biermann D. Cutting edge geometries. *CIRP Annals Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 63. P. 631-653.
90. Denkena B., Köhler J., Mesfina S.M. Influence of the cutting edge rounding on the chip formation process: Part 1. Investigation of material flow, process forces, and cutting temperature. *Production Engineering*. 2012. Vol. 6. P.329-338.
91. Denkena, B., Köhler J., Rehe M. Influence of the honed cutting edge on tool wear and surface integrity in slot milling of 42CrMo4 steel. *Procedia CIRP*. Fifth CIRP Conference on High Performance Cutting. 2012. Vol. 1. P. 190-195.
92. Denkena B., Köhler J., Schindler A. Behavior of the magnetic abrasive tool for cutting edge preparation of cemented carbide end mills. *Production Engineering – Research and Development*. 2014. Vol. 8, P. 627–633.
93. Denkena B., Köhler J., Ventura C.E.H. Customized cutting edge preparation by means of grinding. *Precision Engineering*. 2013. Vol. 37. P. 590 – 598.
94. Denkena B., Leon L., Bassett E. Preparation of Designed Cutting Edge Microgeometries by Simultaneous 5-Axes Brushing. ICMEN. 3rd International Conference on Manufacturing Engineering. Greece, 2008. P. 117–123.
95. Denkena B., Lucas A., Bassett E. Effects of the cutting edge microgeometry on tool wear and its thermo-mechanical load. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 60. P. 73-76.
96. Features of magneto-abrasive machining of taps / V. Maiboroda, D. Tarhan, D. Dzhulii, I. Slobodianiuk. *Acta Mechanica et Automatica*. 2020. Vol. 14(1). 7 p.
97. Gil D. V., A., Fernández J.C. Monitoring of thread quality when tapping nodular cast iron with TiN-coated HSS cutting taps. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 69. P 1273–1282.

98. Gultekin U., Ihsan K. The effects of cutting conditions on the cutting torque and tool life in the tapping process for AISI 304 stainless steel. *Materials and technology*. 2016. Vol. 50, P. 275-280.
99. Hashimoto F., Yamaguchi H. Abrasive fine-finishing technology. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 65, P. 597-620.
100. Influence of magneto-abrasive machining duration on the precision of hss taps / V. Maiboroda, D. Tarhan, O. Byelyayev, D. Dzhulii. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*. 2019. Vol. 96. P. 70–76.
101. Jain R.K., Jain V.K. Abrasive fine finishing processes - a review. *Journal for Manufacturing Science and Production*. 1999. Vol. 2. P. 55–68.
102. Jayaswal S.C., Jain V.K., Dixit P.M. Modeling and simulation of magnetic abrasive finishing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2005. Vol. 26. P. 477-490.
103. Karpuschewski B., Byelyayev O., Maiboroda V. Magneto-abrasive machining for the mechanical preparation of high-speed steel twist drills. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2009. Vol. 58. P. 295-298.
104. Keksin A.I. Methods of increasing the quality of the thread pitches. *Agronomy Research*. 2013. Vol. 11, P. 139-146.
105. Kim J.D., Choi M.S. Simulation for the prediction of surface-accuracy in magnetic abrasive machining. *Journal of Materials Processing Technology*. 1995. Vol. 53. P. 630-642.
106. Klocke F., Krig F. Coated tools for metal cutting – features and applications. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 1999. Vol. 48. P. 515 – 525.
107. Kwak J.S. Mathematical model determination for improvement of surface roughness in magnetic-assisted abrasive polishing of nonferrous AISI316 material. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*. 2012. Vol. 22. P. 845-850.
108. Magnetic-abrasive finishing of cutting tools for high-speed machining of titanium alloys / H. Yamaguchi, A. Srivastava, M. Tan, F. Hashimoto. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2014. Vol. 7, P. 299–304.

109. Magnetic-abrasive machining drills of high-speed steel. / V. Maiboroda, I. Tkachuk, N. Minitska, D. Dzhulii. *Reliability of the tool and optimization of technological systems*. 2012. Vol. 31, P. 271–279.
110. Magnetic-abrasive machining of end-cutting tool in a large magnetic gaps with using the restore elements. / V. Maiboroda, D. Dzhulii, I. Tkachuk, O. Byelyaev. *Scientific journal of the Ternopil State Technical University*. 2012. Vol. 4, P. 133–141.
111. Maksarov V.V. Keksin A.I. Technology of magnetic-abrasive finishing of geometrically-complex products. *IOP Conference Series-Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 327. Article Number: UNSP 042068.
112. Methode zur Präparation von Zerspanwerkzeugen: Leistungsoptimierung der Schneidkante. / B. Denkena, N. Kramer, F. Siegel, J. Kästner. *VDI-Z SpezialWerkzeuge*. 2007. Vol. 8. P. 24 – 26.
113. Mori T.; Hirota K.; Kawashima Y. Clarification of magnetic abrasive finishing mechanism. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol. 143. P. 682–686.
114. Olt J., Maksarov V., Keksin A. Internal thread cutting process improvement based on cutting tools treatment by composite powders in a magnetic field. *Journal of Silicate Based and Composite Materials*. 2018. Vol. 70, P. 128–131.
115. Optimization of process parameters affecting surface roughness in magnetic abrasive finishing process / A. Shadab, G. Swati, C.Y. Chand, D.K. Singh. *Materials and Manufacturing Processes*. 2017. Vol. 32, P. 1723-1729.
116. Patel H.J., Patel B.P., Patel S.M. A review on thread tapping operation and parametric study. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2011. Vol. 2, P. 109-113.
117. Payam S., Hamid S. M., Bahram M. Study of magnetic abrasive finishing for AISI321 stainless steel. *Materials and Manufacturing Processes*. 2016. Vol. 31. P. 2023-2029.
118. Pereira I.C., Vianello P.I., Boing D. An approach to torque and temperature thread by thread on tapping, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 106, P. 4891–4901.

119. Piska M., Sliwkova P. Surface parameters, tribological tests and cutting performance of coated HSS taps. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 100, P. 125-134.
120. Rech J. Cutting edge preparation and surface issues. *International Conference Smart solutions for metal cutting*. HSS Forum. Aachen, 2005. P. 1-12.
121. Risse K. Einflüsse von Werkzeugdurchmesser und Schneidkantenverrundung beim Bohren mit Wendelbohrern in Stahl : Phd-Thesis : Bad Godesberg, 2006. P. 151.
122. Saito Y, Takiguchi S, Yamaguchi T. Effect of friction at chip-tool interface on chip geometry and chip snarling in tapping process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2016. Vol. 107, P. 60-65.
123. Shinmura T., Takazawa K., Hatano E. Study on magnetic abrasive process: application to edge finishing. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*. 1985. Vol. 19(3), P. 218–220.
124. Shinmura T., Takazawa K., Hatano E. Study on magnetic abrasive process: application to plane finishing. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*. 1985. Vol. 19(4), P. 289–291.
125. Singh D.K., Jayswal S.C., Jain, V.K. Magnetic abrasive finishing (MAF). *Micromanufacturing processes*. 2013. Vol. 8, P. 155-182.
126. Study on magnetic abrasive process: finishing characteristics. / T. Shinmura, K. Takazawa, E. Hatano, T. Aizawa. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*. 1984. Vol. 18, P. 347–348
127. Study on magnetic abrasive process: process principle and finishing possibility. / T. Shinmura, K. Takazawa, E. Hatano, T. Aizawa. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*. 1985. Vol. 19(1), P. 54–55.
128. Tengyun C., John W.S. Investigation of thread tapping load characteristics through mechanistics modeling and experimentation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2002. Vol. 42. P. 1527-1538.
129. Thiel W. Reproduzierbare Verrundung von Schneidkanten an Mikrowerkzeugen. *XIII Internationales Oberflächenkolloquium. Chemnitz, 12.–14. März 2012*. Chemnitz, 2012. P. 63–70.

130. Tikal F., Bienemann R., Heckmann L. Schneidkantenpräparation Ziele, Verfahren und Messmethoden. Berichte aus Industrie und Forschung. Kassel : Kassel University Press GmbH, 2009. 193 p.
131. Vahdati M. Rasouli S. A. Study of magnetic abrasive finishing on freeform surface. *Transactions of the Institute of metal finishing*. 2016. Vol. 94, P. 294-302.
132. Warrington C., Kapoor S., Devor R. Finite element modeling for tap design improvement in form tapping. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2006. Vol. 128. P 65–73.
133. Wu J., Zou Y., Sugiyama H. (2016), Study on finishing characteristics of magnetic abrasive finishing process using low-frequency alternating magnetic field. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 85. P. 585-594.

ДОДАТОК А

ЗАТВЕРДЖУЮ



Мохнатюк О.В.

2020 р.

АКТ

практичного використання результатів дисертаційної роботи

Таргана Дмитра Валентиновича

Даний акт складено на основі того, що на підприємстві «Група компаній «ВЕДА» при виконанні операцій механічного оброблення корпусних деталей, а саме нарізання різь М6 і М8 були використані мітчики, які піддавалися магнітно-абразивному обробленню на спеціально розробленому верстаті з кільцевим розташуванням магнітних зазорів. При виконанні оброблення було використано наступні результати дисертаційної роботи Таргана Д.В.:

- результати моделювання процесу магнітно-абразивного оброблення мітчиків з метою визначення раціональних умов базування інструменту в зонах оброблення;

- результати досліджень впливу магнітно-абразивного оброблення на характер розподілення твердості по глибині матеріалу мітчиків, зміну шорсткості робочих поверхонь мітчиків і формування радіусів округлення різальних кромek мітчиків із швидкорізальної сталі;

- результати експлуатаційних досліджень мітчиків;

Використання запропонованого магнітно-абразивного оброблення для підвищення працездатності мітчиків із швидкорізальної сталі дозволить знизити їх витрати у 1,5 – 2 рази.

Головний інженер ТОВ «ВЕДА»

Круподеров А.В.

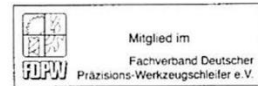


ZOM Oberflächenbearbeitung GmbH, Alt Salbke 6-10, 39122 Magdeburg

National Technical University of Ukraine
Institute of Mechanical Engineering

Z.Hd. Herrn Dmytro Targan

CNC-Werkzeugschleiferei
Hartstoffbeschichtung
Hochglanzpolieren
Plasmanitrieren
Neuanfertigungen



ZOM
Oberflächenbearbeitung GmbH
Alt Salbke 6-10
39122 Magdeburg

Bestätigung

der praktischen Umsetzung der Forschungsergebnisse der Doktorarbeit von Herrn Dmytro Targan.

Wir bestätigen hiermit, dass die im Rahmen der Doktorarbeit von Herrn Dmytro Targan gewonnenen Forschungsergebnisse einen industriellen Einsatz in unserem Unternehmen ZOM Oberflächenbearbeitung GmbH gefunden haben. Dazu gehören unter anderem:

- Anwendung relevanter Parameter der magnetabrasiven Bearbeitung (MAB) von Gewindebohrern aus Schnellarbeitsstahl (HSS) mittels der MAB-Anlage mit ringförmigen, koaxial gerichteten Polschuhen;
- Einführung der Technologie zur Finish-Bearbeitung von Gewindebohrern aus HSS zur Erhöhung ihrer Leistungsfähigkeit;
- Ergebnisse der Zerspanungsuntersuchungen;
- Nutzung der Forschungsergebnisse des Einflusses der MAB auf die Mikro-Geometrie der Gewindebohrer.

Die in Kooperation mit ZOM durchgeführten Untersuchungen zur magnetabrasiven Bearbeitung von Gewindebohrern aus Schnellarbeitsstahl zeigen, dass durch den Einsatz der im Rahmen der Forschungsarbeit von Herrn Dmytro Targan optimierten und empfohlenen Bearbeitungstechnologie eine mehr als 2-fache Standzeiterhöhung der Werkzeuge erreicht werden kann, was hauptsächlich auf den komplexen Einfluss der MAB auf die Mikrogeometrie der Schneidkanten, sowie auf die Qualität und die physikalisch-mechanischen Eigenschaften der magnetabrasiv behandelten Werkzeug-Oberflächen zurückzuführen ist.

Mit freundlichen Grüßen

Volker Hoffmann
Geschäftsführer
ZOM - CNC-Werkzeugschleiferei
- Hartstoffbeschichtung
Oberflächenbearbeitung GmbH
Alt Salbke 6-10, 39122 Magdeburg
Tel.: 0391/408 22 30 Fax: 0391/408 22 40

Magdeburg, den 07.07.2020

Geschäftsführer:
Volker Hoffmann
Amtsgericht Stendal
HRB: 112378

Tel.: 0391/408 22 30
Fax: 0391/408 22 40
www.zom-magdeburg.de
E-Mail: info@zom-magdeburg.de

SSK Magdeburg
IBAN: DE72 8105 3272 0032 5602 76
BIC: NOLADE21MDG

Commerzbank AG
IBAN: DE88 8108 0000 0333 0825 00
BIC: COBADEFFXXX

Deutsche Bank
IBAN: DE70 8107 0024 0124 5091 00
BIC: DEUTDE33HAN

ДОДАТОК Б

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Майборода В.С. Вплив магнітно-абразивного оброблення на якість мітчиків із швидкорізальної сталі / В.С. Майборода, І.В. Ткачук, Д.Ю. Джулій, Д.В. Тарган // Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2013. – №772. – С. 202-207. *(Здобувачем виконано експериментальну роботу та аналіз впливу МАО на мікрогеометрію різальних кромek та поверхонь мітчиків.)*
2. Майборода В.С. Вплив магнітно-абразивного оброблення на мікрогеометрію та експлуатаційні показники мітчиків зі швидкорізальної сталі / В.С. Майборода, Д.В. Тарган // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – Житомир: ЖДТУ, 2015. – №15. – С. 59-65. *(Здобувачем виконано експериментальну роботу по обробленні та експлуатації мітчиків, проведено вимірювання зносу зубців та аналіз результатів досліджень.)*
3. Тарган Д.В. Аналіз інтенсивності магнітно-абразивного оброблення мітчиків в залежності від кінематичних параметрів процесу / Д.В. Тарган, В.С. Майборода, Д.Ю. Джулій // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Сучасні технології в машинобудуванні, транспорті та гірництві. – Кременчук: КрНУ, 2017. – №106. – С. 82-88. *(Здобувачем запропоновано геометричне та математичне моделювання процесу МАО мітчиків з кутом профілю 60° на верстаті з кільцевим розташуванням робочої зони та виконано аналіз впливу кута нахилу мітчика на інтенсивність оброблення.)*
4. Майборода В.С. Магнітно-абразивне оброблення мітчиків із швидкорізальної сталі на верстаті з кільцевим розташуванням робочої зони / В.С. Майборода, Д.В. Тарган, О.Б. Мусіюк // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Краматорськ: ДДМА, 2017. – №40. – С. 105-114. *(Здобувачем виконано вимірювання мікрогеометрії та поверхневої твердості мітчиків, проаналізовано вплив вертикального розташування мітчиків в робочій зоні верстату на параметри їх якості.)*

5. Тарган Д.В. Вплив магнітно-абразивного оброблення на твердість та структуру матеріалу мітчиків із швидкорізальної сталі / Д.В. Тарган, В.С. Майборода // Вісник Херсонського національного технічного університету. – Херсон: ХНТУ, 2017. – №61. – С. 119-125. *(Здобувачем запропонована методика дослідження твердості по глибині матеріалу робочої частини мітчиків, виконана експериментальна робота та аналіз результатів.)*

6. Майборода В.С. Вплив магнітно-абразивного оброблення на якість шпонкових фрез із швидкорізальної сталі / В.С. Майборода, І.В. Слободянюк, Д.Ю. Джулій, Д.В. Тарган // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні: зб. наук. пр. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – №6(1282) С. 55-59. *(Здобувачем проведено експериментальні дослідження та аналіз впливу складу магнітно-абразивного інструменту на шорсткість та твердість робочих поверхонь фрез.)*

7. Тарган Д.В. Вплив кінематики процесу магнітно-абразивного оброблення на параметри якості робочих поверхонь мітчиків із швидкорізальної сталі / Д.В. Тарган, В.С. Майборода, О.А. Плівак, Г.Г. Добровольський // Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки. – Житомир. : ЖДТУ, 2018. – №81. – С. 48-53. *(Здобувачем запропонована методика наглядної оцінки якості магнітно-абразивного оброблення поверхонь мітчиків в залежності від кута нахилу інструменту до площини робочої зони верстату та виконано аналіз результатів експериментальних досліджень.)*

8. Maiboroda V. Influence of magneto-abrasive machining duration on the precision of HSS taps / V. Maiboroda, D. Tarhan, O. Byelyayev, D. Dzhulii // Scientific Journal of TNTU. – Tern. : TNTU, 2019. – Vol 96. – P. 70–76. *(Здобувачем виконано експериментальні дослідження та аналіз результатів вимірювання зовнішнього діаметру мітчиків.)*

9. Maiboroda V. Features of magneto-abrasive machining of taps / V. Maiboroda, D. Tarhan, D. Dzhulii, I. Slobodianiuk // Acta Mechanica et Automatica. – Bialystok University of Technology, Poland, 2020. Vol. 51. 7 p. *(Здобувачем запропоновано метод оцінки інтенсивності оброблення, проведено*

розрахунки інтегральної інтенсивності МАО мітчиків та аналіз результатів. Визначено особливості процесу МАО мітчиків та запропоновано режими для їх ефективного оброблення.)

Роботи апробаційного характеру:

10. Майборода В.С. Магнітно-абразивне оброблення мітчиків, виготовлених із швидкорізальної сталі / В.С. Майборода, І.В. Ткачук, Д.В. Тарган // Прогресивні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць II-ої Всеукраїнської наук.-техн. конф., м. Львів, 10-15 лютого 2014р. – Львів, 2014. – С. 38. *(Здобувачем виконано експериментальні дослідження та аналіз результатів вимірювання шорсткості та твердості)*

11. Тарган Д.В. Умова вільного розміщення стружки в канавках мітчиків / Д.В. Тарган, Д.О. Красновид // Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї, наука, виробництво: тези доповідей XIV Всеукраїнської мол. наук.-техн. конф., 27–31 жовтня 2014 р., м. Суми. – Суми. : СумДУ, 2014. – С. 95-96. *(Здобувачем виконано аналіз конструктивних параметрів стружкової канавки мітчика.)*

12. Тарган Д.В. Дослідження геометрії мітчиків із швидкорізальної сталі після магнітно-абразивного оброблення / Д.В. Тарган, Д.О. Красновид, В.С. Майборода // Тези доповідей загальноунівер. наук.-техн. конф. молодих вчених та студ., присвяченої дню Науки. Секція "Машинобудування", підсекція Інтегровані технології машинобудування". – К: НТУУ "КПІ", 2014. – С. 89. *(Здобувачем проведено вимірювання зовнішнього діаметру мітчиків та визначено вплив МАО на зміну параметра.)*

13. Тарган Д.В. Вплив магнітно-абразивного оброблення на якість мітчиків із швидкорізальної сталі / Д.В. Тарган, В.С. Майборода, Ю.Й. Бесарабець // Тези доповідей загальноунівер. наук.-техн. конф. молодих вчених та студ., присвяченої дню Науки. Секція "Машинобудування", підсекція Інтегровані технології машинобудування". – К: НТУУ "КПІ", 2014. – С. 91-92.

(Здобувачем виконано експериментальні дослідження та аналіз результатів вимірювань радіусів округлення та шорсткості)

14. Тарган Д.В. Вплив магнітно-абразивного оброблення на стійкість мітчиків із швидкорізальної сталі / Д.В. Тарган, В.С. Майборода, Д.О. Красновид // Тези доповідей загальноунівер. наук.-техн. конф. молодих вчених та студ., присвяченої дню Науки. Секція "Машинобудування", підсекція "Інтегровані технології машинобудування". – К: НТУУ "КПІ", 2015. – С. 102. *(Здобувачем виконано експериментальну роботу по обробленні та експлуатації мітчиків, проведено вимірювання зносу зубців та аналіз результатів досліджень.)*

15. Тарган Д.В. Дослідження впливу підточування передньої поверхні на геометрію в процесі різання та стійкість мітчиків, виготовлених із швидкорізальної сталі / Д.В. Тарган, В.С. Майборода, В.В. Вовк // Збірка матер. Всеукраїнської наук.-техн. конф. молодих вчених та студ. «Інновації молоді – машинобудуванню», секція "Інтегровані технології машинобудування". – К: НТУУ "КПІ", 2016. – С. 62-65. *(Здобувачем виконано аналітичні розрахунки зміни кінематичних кутів мітчика в залежності від форми передньої поверхні та проведено експериментальні дослідження.)*

16. Тарган Д.В. Вплив магнітно-абразивного оброблення на якісні характеристики мітчиків із швидкорізальної сталі / Д.В. Тарган, В.С. Майборода, О.Б. Мусіюк // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матер. Міжнародної наук.-техн. конф., 30 травня – 1 червня 2017 р. – Краматорськ: ДДМА, 2017. – С. 89. *(Здобувачем проведено експериментальну роботу та визначено вплив вертикального розташування мітчиків в робочій зоні верстату на мікрогеометрію та фізико-механічні характеристики робочих поверхонь.)*

17. Тарган Д.В. Вплив магнітно-абразивного оброблення на твердість та структурні параметри матеріалу мітчиків / Д.В. Тарган, В.С. Майборода // Матер. міжнарод. наук.-практ. конф. «Сучасні технології промислового комплексу», 12-17 вересня 2017 р., випуск 3. – Херсон: ХНТУ, 2017. – С. 224-225. *(Здобувачем*

запропонована методика дослідження твердості по глибині матеріалу робочої частини мітчиків, проведено вимірювання та аналіз результатів.)

18. Мусіюк О.Б. Магнітно-абразивне оброблення мітчиків з вертикальним розташуванням в робочій зоні [Електронний ресурс] / О.Б. Мусіюк, Д.В. Тарган, В.С. Майборода // Матер. Всеукраїнської наук.-техн. конф. молодих вчених та студ. «Інновації молоді – машинобудуванню 2017», секція «Інтегровані технології машинобудування». – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 3 с. – Режим доступу до ресурсу: <http://s-konf.mmi.kpi.ua/imm2017/paper/view/7904>. *(Здобувачем виконано експериментальні дослідження.)*

19. Мусіюк О.Б. Дослідження твердості по глибині та структури матеріалу мітчиків після магнітно-абразивного оброблення [Електронний ресурс] / О.Б. Мусіюк, Д.В. Тарган, В.С. Майборода // Матер. Всеукраїнської наук.-техн. конф. молодих вчених та студ. «Інновації молоді – машинобудуванню 2017», секція «Інтегровані технології машинобудування». – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 3 с. – Режим доступу до ресурсу: <http://s-konf.mmi.kpi.ua/imm2017/paper/view/7906>. *(Здобувачем запропонована методика дослідження твердості по глибині матеріалу робочої частини мітчиків, проведено вимірювання твердості.)*

20. Тарган Д.В. Перекриття досліджуваної точки робочої частини мітчика при магнітно-абразивному обробленні [Електронний ресурс] / Д.В. Тарган, В.С. Майборода, Д.Ю. Джулій // Матер. Всеукраїнської наук.-техн. конф. молодих вчених та студ. «Інновації молоді – машинобудуванню 2017», секція «Інтегровані технології машинобудування». – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 2 с. – Режим доступу до ресурсу: <http://s-konf.mmi.kpi.ua/imm2017/paper/view/7908>. *(Здобувачем виконано графічне та математичне моделювання процесу МАО мітчиків та визначено зону «перекривання».)*

21. Тарган Д.В. Дослідження градієнту магнітного поля в робочій зоні верстату для магнітно-абразивного оброблення [Електронний ресурс] /

Д.В. Тарган, В.С. Майборода, І.В. Слободянюк // Матер. Всеукраїнської наук.-техн. конф. молодих вчених та студ. «Інновації молоді – машинобудуванню 2017», секція «Інтегровані технології машинобудування». – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 2 с. – Режим доступу до ресурсу: <http://s-konf.mmi.kpi.ua/imm2017/paper/view/7910>. *(Здобувачем виконано вимірювання магнітної індукції в робочій зоні верстату та аналіз результатів замірів.)*

22. Слободянюк І.В. Особливості формування магнітно-абразивного інструменту / І.В. Слободянюк, В.С. Майборода, Д.Ю. Джулій, Д.В. Тарган // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матер. Міжнародної наук.-техн. конф., 29-31 травня 2018 р. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – С. 80. *(Здобувачем виконано експериментальні дослідження.)*

23. Тарган Д.В. Вплив розташування мітчиків в робочій зоні верстату на параметри якості їх робочих поверхонь при магнітно-абразивному обробленні / Д.В. Тарган, В.С. Майборода // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матер. тез доповідей VIII міжнародної наук.-практ. конф. (м. Чернігів, 10–12 травня 2018 р.): у 2-х т. – Чернігів: ЧНТУ, 2018. – Т. 1. – С. 137-138. *(Здобувачем виконано експериментальні дослідження та визначено вплив кута нахилу мітчиків до площини робочої зони верстату на параметри якості інструменту.)*

24. Тарган Д.В. Експериментальне визначення зон «перекривання» зубців мітчика при магнітно-абразивному обробленні [Електронний ресурс] / Д.В. Тарган, В.С. Майборода, І.В. Слободянюк // Матер. Всеукраїнської наук.-техн. конф. молодих вчених та студ. «Інновації молоді – машинобудуванню 2018». – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 2с. – Режим доступу до ресурсу: <http://s-konf.mmi.kpi.ua/imm2018/paper/view/13352>. *(Здобувачем запропонована методика оцінки інтенсивності оброблення робочих поверхонь мітчиків та проведено експериментальні дослідження.)*

25. Тарган Д.В. Вплив магнітної індукції на швидкість обертання деталей / Д.В. Тарган, І.В. Слободянюк, Д.Ю. Джулій, В.С. Майборода // Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво.

Матер. міжнародної наук.-практ. конф., 31 жовтня — 02 листопада 2018 р. — Краматорськ: ДДМА, 2018. — С.179-181. *(Здобувачем виконано аналіз результатів вимірювань швидкості обертання.)*

26. Тарган Д.В. Вплив магнітно-абразивного оброблення на точність мітчиків M12 із швидкорізальної сталі / Д.В. Тарган, В.С. Майборода, І.В. Слободянюк, Д.Ю. Джулій // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матер. Міжнародної наук.-техн. конф., 4-7 червня 2019 р. — Краматорськ: ДДМА, 2019. — С. 114. *(Здобувачем виконано експериментальні дослідження та аналіз результатів вимірювань.)*